



Universidade de Aveiro
Ano 2016

Departamento de Engenharia de Materiais e
Cerâmica

**Sara Raquel Santos
Ferreira**

**Seleção de parâmetros na soldadura MIG robotizada
de tubos de alumínio para quadros de bicicleta**



**Sara Raquel Santos
Ferreira**

**Seleção de parâmetros na soldadura MIG robotizada
de tubos de alumínio para quadros de bicicleta**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe José Alves de Oliveira, Equiparado a Investigador Principal e coorientação do Professor Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva, Professor Associado, ambos do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

O júri
Presidente

Professor Doutor Augusto Luís Barros Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor Joaquim Manuel da Graça Sacramento
Professor Coordenador S/ Agregação da Universidade de Aveiro

Doutor Filipe José Alves de Oliveira
Investigador Principal da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Doutor Filipe Oliveira e ao Professor Doutor Rui Silva pela orientação ao longo do trabalho.

Ao meu pai, não só por me orientar neste projeto mas também pela aprendizagem ao longo da minha vida, todo o amor e apoio.

Ao Alexandre Tavares, Carlos Marques e Eduardo Tavares que sempre estiveram disponíveis para me ajudar e a todo o pessoal da MIRALAGO pelo apoio prestado.

À Eng^a Ana Ribeiro e ao pessoal do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica pelo apoio ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos, por me aconselharem, me ouvirem e apoiarem.

À minha mãe, à minha irmã, ao meu cunhado e restante família, pelo apoio incondicional que sempre demonstraram, pelo amor, pela força e pelos puxões de orelhas.

palavras-chave

Al 6063; Al 4043; Soldadura MIG; Defeitos; Comportamento mecânico; Qualidade

resumo

Este estágio curricular foi realizado na Empresa Ciclista MIRALAGO,S.A., uma empresa metalomecânica sediada em Aguada de Cima, Águeda. O trabalho teve como objetivo a caracterização microestrutural e mecânica de tubos de alumínio soldados, antes e após tratamentos térmicos, para avaliação da qualidade de soldaduras MIG robotizada feitas em ambiente industrial.

Para o efeito produziu-se provetes com soldaduras em T de tubos de alumínio Al 6063 de 30 mm e 40 mm com 2 mm de espessura de parede para simulação da soldadura de quadros de bicicleta. Para isso utilizou várias sequências de programas, modificando a potência elétrica, a velocidade de alimentação do fio (Al 4043), a trajetória, geometria e velocidade do movimento e também o tipo de transferência do metal de adição para a junta de soldadura (spray pulsado ou por curto-circuito em arco pulsado). As diferentes sequências tiveram uma evolução que se baseou na experiência do soldador/programador e no aspeto visual das soldaduras. Como parte do trabalho foi desenhado e construído um gabari para fixação dos tubos que permitiu fazer a soldadura completa numa só passagem.

Como parte de uma análise com relevância industrial para quadros de bicicleta, procedeu-se à verificação da conformidade das soldaduras dos provetes com a norma internacional (ISO 10042:2005), que define a deteção e caracterização de defeitos. Para esta tarefa recorreu-se à seleção e preparação metalográfica de juntas soldadas (secções em cruz relativamente ao tubo de menor diâmetro) e à análise micro e macroestrutural em quatro zonas distintas do cordão de soldadura (no início do percurso de soldadura e a cada 90°) com auxílio de microscópio ótico e lupa binocular. Uma componente importante do trabalho, com relevância industrial, centrou-se no comportamento mecânico dos provetes soldados, que foi avaliado em ensaios de tração a provetes sujeitos a tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial. Para este ensaio foi desenhado e construído um sistema de fixação dos provetes em T que permite exercer uma tensão de tração sobre o cordão de soldadura, minimizar a deformação dos tubos nas zonas de amarração e fixá-lo à máquina de ensaios mecânicos.

Através da análise macrográfica, realizada de acordo com a norma ISO 10042:2005, verificou-se que as soldaduras que utilizaram o sistema de transferência de metal na forma de curto-circuito com arco pulsado (CMT- cold metal transfer) são as que permitem obter melhores resultados. Esta análise mostra também que, em todas as amostras, a parte inicial do percurso da soldadura é uma zona de fragilização devido ao excesso de porosidade e/ou à falta de penetração da soldadura nos tubos. A análise microestrutural revela uma microestrutura típica da zona do banho de fusão liga Al 4043 com poros: dendrites de solução sólida α -Al com fase intergranular de composição eutética α -Al/Si. Após têmpera e envelhecimento o constituinte eutético passa de filme contínuo para globular, eventualmente com precipitação da fase intermetálica AlFeSi. Na interface fundido/ZTA os cristais de α -Al mostram dendrites com ramificações secundárias, no lado do fundido e grãos equiaxiais de α -Al marcados pela precipitação da fase Mg₂Si no lado da liga.

Os ensaios mecânicos de tração revelaram que a resistência da junta soldada e tratada termicamente se encontra entre os valores da liga 6063-T6 (tensão de rutura máxima de 245 MPa), e o valor da resistência à tração para a liga 4043 (145 MPa), com valor médio de 197 ± 17 MPa. Em mais de 40% dos provetes, as juntas soldadas têm um valor típico de tensão de rutura igual ou superior a 206 MPa, o valor de referência para esta combinação de ligas.

Deste modo pode afirmar-se que, apesar dos defeitos detetados, a qualidade mecânica da generalidade das soldaduras realizadas neste trabalho será adequada para aplicação em quadros de bicicletas, com uma tendência para valores mais homogêneos quando se utiliza a tecnologia CMT ou sequências de programas com potências intermédias.

keywords

Al 6063; Al 4043; MIG welding; Defects; Mechanical behavior; Quality

abstract

This curricular internship was carried out at Empresa Ciclista MIRALAGO, S.A., a metal working company based in Aguada de Cima, Águeda. The objective of this work was to characterize microstructurally and mechanically welded aluminum tubes, before and after heat treatment, to evaluate the quality of weld joints made by robotized MIG welding in an industrial environment.

MIRALAGO produced the welds in aluminum tubes Al 6063 of different dimensions (30 mm and 40 mm in diameter) and with the same wall thickness (2 mm), with a T geometry in a simulation of a bicycle frame welding. For this purpose, it was used several program sequences were used, modifying the power, the wire (Al 4043) feed speed, the welding trajectory, geometry and speed of movement and also the type of transfer of the addition metal to the welding joint (pulsed spray or cold metal transfer-CMT). The different sequences had an evolution that was based on the experience of the welder/programmer and the visual aspect of the welds. As part of the work, a gauge was designed and built to fix the tubes, allowing complete welding in one pass, thus guaranteeing the visual uniformity of the entire weld bead.

As part of an industry-relevant analysis for bicycle frames, the welds of the test pieces were checked for compliance with the international standard (ISO 10042: 2005), which defines the detection and characterization of defects. For this task, a metallographic preparation of welded joints (cross-sections relative to the smaller diameter pipe) and micro- and macrostructural analysis were performed in four distinct zones of the weld bead (at the beginning of the welding path and at 90°, 180° and 270°) with the aid of optical microscope and a binocular magnifier. An important component of the work, with industrial relevance, was focused on the tensile strength behavior of welded test specimens, heat treated by solubilization and artificial aging. For this test, a T-tube fastening system was designed to exert a tensile stress on the weld bead, to minimize the deformation of the tubes in the fixing zones and to attach it to the universal mechanical testing machine. The set was designed and built at MIRALAGO for use at the University of Aveiro.

Through the macrographic analysis, performed according to ISO 10042: 2005, it was verified that the welds that used the cold metal transfer system are those that allow better results. This analysis also shows that, in all samples, the initial portion of the weld path is a zone of reduced strength due to excess porosity and/or lack of weld penetration into the tubes. X-ray diffraction of the welds only allowed to identify aluminum due to the small amount of second phases and the small welding area relative to the analysis area. Microstructural analysis revealed a typical microstructure of the Al 4043 alloy weld pool with pores: α -Al solid solution grains with intergranular phase of α -Al/Si eutectic composition. After quenching and aging, the eutectic constituent changes from continuous to globular, possibly with precipitation of the intermetallic phase AlFeSi. In the weld/ZTA interface the α -Al crystals show dendrites with secondary branching on the melt side and α -Al equiaxed grains marked by the precipitation of the Mg₂Si phase.

Mechanical tests showed that the tensile strength of the welded and thermally treated joint is in the range between the values of the 6063-T6 alloy (maximum tensile stress of 245 MPa), and the value for alloy 4043 (145 MPa), with an average value of 197 ± 17 MPa. In more than 40% of the test pieces, the welded joints have a typical tensile strength of 206 MPa or greater, the reference value for this combination of alloys.

It can thus concluded that, despite the detected defects, the mechanical quality of the welds analyzed in this work are suitable for application in bicycle frames. It is also shown that there is a tendency towards more homogeneous strength values when CMT technology or sequences of intermediate power are used.

Índice

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de símbolos e siglas

Capítulo I – Introdução	1
Capítulo II – Soldadura de ligas de alumínio	3
II.1 – Alumínio e as suas ligas.....	3
II.2 – Tratamentos térmicos de ligas de alumínio	5
II.2.1 – Tratamento de endurecimento por precipitação	8
II.2.2 – Recozimento.....	9
II.3 – Soldadura	9
II.3.1 – Processo de soldadura MIG - <i>Metal Inert Gas</i>	10
II.3.1.1 – Equipamento	10
II.3.1.2 – Materiais consumíveis.....	11
II.3.1.3 – Parâmetros do processo de soldadura MIG	15
II.3.2 – Soldabilidade do alumínio e as suas ligas	17
II.3.3 – Defeitos de soldadura	18
II.3.4 – Efeito do calor no processo de soldadura	19
II.3.5 – Recuperação das propriedades mecânicas afetadas	21
Capítulo III – Produção e caracterização de provetes de alumínio soldados a MIG robotizado	23
III.1 – Produção de provetes de alumínio	23
III.2 – Técnicas de caracterização.....	27
III.2.1 – Análise macrográfica e micrográfica	27
III.2.2 – Análise estrutural por difração de raios X	31
III.2.3 – Ensaio de tração.....	31
Capítulo IV – Resultados e discussão	35
IV.1 – Identificação de defeitos por análise macrográfica	35
IV.2 – Identificação de fases e análise microestrutural	38
IV.4 – Comportamento à tração	41
Capítulo V – Conclusões	45
Capítulo VI – Trabalho adicional desenvolvido na empresa durante o estágio	47
Bibliografia.....	49

ANEXOS..... 51

Lista de Figuras

Figura 1: Alguns dos produtos MIRALAGO.	1
Figura 2: Diagrama pseudo-binário Al-Mg ₂ Si. ^[9]	6
Figura 3: Resistência e dureza vs tempo de envelhecimento, de acordo com a coerência e incoerência dos precipitados com a matriz, para a liga Al-Cu. ^[11,13]	9
Figura 4: Esquema de equipamento para soldadura MIG. ^[15]	11
Figura 5: Influência do tipo de gás no cordão de soldadura, à esquerda por hélio+árgon e à direita por árgon. ^[6]	12
Figura 6: Tipos de juntas mais comuns em chapas e em tubos. ^[16]	12
Figura 7: Modos de transferência do metal. ^[17]	13
Figura 8: Transferência do metal de adição por CMT. ^[19,20]	14
Figura 9: Esquema do bocal e da extensão do eletrodo. ^[7]	16
Figura 10: Ângulos de deslocamento e de trabalho da tocha. ^[12]	17
Figura 11: Solubilidade do hidrogênio no Alumínio. ^[5]	18
Figura 12: Alguns dos defeitos possíveis de encontrar no processo de soldadura. ^[14]	19
Figura 13: Diferentes regiões de um cordão de soldadura. ^[5]	19
Figura 14: Diagrama esquemático da região de soldadura e da evolução do tamanho de grão. Região A – Zona fundida; Região B – ZTA a alta temperatura (grão grosseiro); Região C – ZTA a baixa temperatura (grão refinado) e Região D – Metal base não afetado.....	20
Figura 15: Esquema da resistência mecânica ao longo da junta, onde A ⁺ representa a zona parcialmente fundida.	20
Figura 16: Ilustração da junta de soldadura (a) e do gabari de fixação dos tubos a soldar (b)..	23
Figura 17: Esquema da célula de soldadura robotizada e dos seis movimentos do robot.	24
Figura 18: Foto do forno para o tratamento de solubilização e provetes no suporte	25
Figura 19: Forno para tratamento térmico de envelhecimento e posição dos provetes.....	26
Figura 20: Representação gráfica do tratamento térmico feito aos provetes de alumínio.	27
Figura 21: Resumo do processo de produção dos provetes.	27
Figura 22: Amostra da zona 1, embutida em resina e polida	29
Figura 23: Exemplo de medição do excesso de penetração do cordão de soldadura pelo <i>software ImageJ</i>	30
Figura 24: Desenho técnico do sistema de fixação dos provetes (1) para os ensaios de tração, com identificação de todos os componentes produzidos (2 a 14) e ligação com pinos fixadores na máquina (15).	32
Figura 25: Esquema da montagem com fixação do provete (à esquerda) e fotografia de início de ensaio de um provete na máquina de tração (à direita).	33
Figura 26: Macrografias das quatro zonas de corte do provete 11 e alguns dos defeitos analisados.	37
Figura 27: Macrografias das quatro zonas de corte do provete 25 e alguns dos defeitos analisados.	38

Figura 28: Micrografias da zona fundida da junta soldada antes do tratamento térmico (a) e depois (b).....	39
Figura 29: Diagrama de fases Al-Si. ^[27]	39
Figura 30: Micrografia ótica do provete 29 relativa à zona entre o cordão de soldadura e a ZTA antes do tratamento térmico.....	40
Figura 31: Micrografia ótica do provete 17 relativa à zona entre o cordão de soldadura e a ZTA após tratamento térmico.....	40
Figura 32: Difratoograma da zona 3 dos provetes 11 e 25 e da resina de embutimento.....	41
Figura 33: Deformação do tubo.....	42
Figura 34: a) Fratura na ZTA do provete 26 e b) fratura no cordão de soldadura do provete 20.	42

Lista de Tabelas

Tabela 1: Comparação de propriedades entre o alumínio e o aço. ^[4]	3
Tabela 2: Efeitos gerais da adição dos principais elementos de liga. ^[5]	4
Tabela 3: Designação das ligas de alumínio para trabalho mecânico.....	4
Tabela 4: Composição química das ligas 6XXX mais comuns, em percentagem. ^[8]	5
Tabela 5: Composição química da liga 4043 (metal de adição). ^[8]	5
Tabela 6: Designação dos tratamentos sofridos pelo alumínio. ^[5]	7
Tabela 7: Subdivisões do estado metalúrgico T segundo a AA ^[11]	7
Tabela 8: Propriedades mecânicas da liga 6063 em diferentes tratamentos térmicos. ^[12]	8
Tabela 9: Alguns defeitos e as suas possíveis origens. ^[4]	18
Tabela 10: Parâmetros de soldadura utilizados.....	24
Tabela 11: Séries de provetes produzidos.....	25
Tabela 12: Tipos de defeitos e os seus limites que foram analisados, de acordo com a norma ISO 10042:2005	36
Tabela 13: Valores de tensão de rutura.....	43

Lista de símbolos e siglas

AA – *Aluminium Association*

ZTA – *Zona Termicamente Afectada*

T – *Tratamiento térmico*

HV – *Hardness Vickers*

TIG – *Tungsten Inert Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

CMT – *Cold Metal Transfer*

ISO - *International Organization for Standardization*

Capítulo I – Introdução

O presente estágio desenvolveu-se no âmbito de uma parceria entre o Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e a Empresa Ciclista MIRALAGO, S.A., uma empresa metalomecânica sediada em Aguada de Cima, Águeda. Esta foi fundada em 1956, tendo como principal atividade a fabricação de pinhões de ataque e cremalheiras para motorizadas, produtos que na época não eram produzidos em Portugal. Em 1971, com o objetivo de criar condições de competitividade na indústria de bicicletas no mercado externo e interno, surge a empresa Órbita – Bicycletas Portuguesas, Lda., na qual a MIRALAGO passa a deter uma parte do capital. A atividade principal da Órbita consiste na montagem e comercialização de todos os tipos de bicicletas a partir dos componentes oriundos das empresas associadas onde se destaca como fornecedor a MIRALAGO. Em 1997, a MIRALAGO obteve certificação pela norma NP EN ISO 9002, culminando uma fase de reestruturação global da empresa, com investimento em diversas áreas: qualidade, organização e gestão, produtividade, etc. Nesse mesmo ano ainda é atribuído pelo IAPMEI (Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação) à MIRALAGO, o estatuto de PME Excelência, devido à qualidade de gestão e tendo por base os indicadores económico-financeiros obtidos.

O ano 2012 foi marcado pela entrada da MIRALAGO, com marca própria, no mercado associado à mobilidade urbana com o lançamento do 1º sistema integrado de bicicletas de uso partilhado, em Vilamoura. Em termos de processos, na MIRALAGO, são realizadas as operações que permitem trabalhar de inúmeras formas o aço com a ajuda de máquinas como: tornos universais, automáticos e CNC; prensas; fresadoras; brochadoras; engenhos de furar, roscar, rebitar; serrotes; guilhotina; instalações de tratamentos superficiais (linhas de zincagem, niquelagem/cromagem, pintura); instalações de tratamentos térmicos e fornos de revenir; equipamentos de soldadura por arco elétrico com eletrodo consumível e proteção de gás inerte (MIG- *Metal Inert Gas*), manual e automática, soldadura por pontos e ainda equipamento de injeção de plásticos. É deste modo que a empresa produz acessórios para bicicletas e parques de uso partilhado (*Bike Sharing*), acessórios para motociclos e para o setor automóvel, aparelhos de *fitness* e ainda presta serviços nas áreas de tratamentos superficiais. Alguns dos produtos comercializados podem ver-se na Figura 1. Os principais mercados estão localizados em Portugal, França, Espanha e Marrocos.



Figura 1: Alguns dos produtos MIRALAGO.

Em 2013 e 2014 a empresa ficou marcada por mais uma fase de investimento intensivo num projeto que conta com o apoio do COMPETE, e que visava permitir à empresa entrar numa nova área de negócio, a produção de estruturas de alumínio. A globalização e o avanço tecnológico crescente têm obrigado cada vez mais as indústrias a procurarem redução de custos e aumento de competitividade, produtividade e qualidade do produto. O alumínio e as suas ligas aparecem como ótimas alternativas para satisfazerem essas exigências. Este metal, combinado com outros metais (Mn, Mg, Cu, Si, etc.), aliado com tratamento mecânico ou termomecânico, produz ligas que apresentam alta resistência mecânica (até 600 MPa), sendo tão elevada quanto a dos aços estruturais mas com a grande vantagem das ligas de alumínio serem menos densas.

A soldadura é um dos processos mais importantes para a fabricação de componentes e estruturas mecânicas em liga de alumínio. Em particular, a técnica MIG pulsada proporciona uma alta produtividade e utiliza uma corrente média inferior à do processo MIG convencional, diminuindo assim a entrada de calor e, conseqüentemente, as distorções nos componentes devido ao alto coeficiente de expansão térmica destas ligas. Com a robotização do processo MIG esta tecnologia aumentou muito a sua importância industrial. ^[1,2]

A procura pela criação de conhecimento e o desenvolvimento tecnológico na soldadura robotizada de quadros de bicicleta em liga de alumínio constituiu-se como o objetivo geral deste trabalho. O estudo efetuado consistiu na caracterização microestrutural e mecânica de tubos soldados de liga de alumínio 6063, antes e após tratamentos térmicos, visando uma correta seleção de parâmetros a utilizar na soldadura MIG robotizada. O objetivo final deste estudo foi a verificação da conformidade com a norma internacional (ISO 10042:2005) das soldaduras em tubos realizadas por esta tecnologia.

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos, organizados e distribuídos da forma a seguir descrita.

No presente Capítulo I – Introdução, apresenta-se a empresa, o objetivo e a estrutura do trabalho.

No Capítulo II – Soldadura de ligas de alumínio, abordam-se tópicos relativos às ligas de alumínio utilizadas, aos processos de soldadura MIG e tratamento térmico aplicados na MIRALAGO.

No Capítulo III – Produção e caracterização de provetes de alumínio soldados a MIG robotizado, descreve-se a preparação dos provetes de alumínio a partir dos tubos soldados e as técnicas utilizadas para a sua caracterização.

No Capítulo IV – Resultados e discussão, apresenta-se detalhadamente os resultados de cada técnica de caracterização utilizada e analisam-se os mesmos com base na metodologia descrita no capítulo III.

No Capítulo V – Conclusões, apresentam-se as principais conclusões decorrentes dos ensaios realizados.

No capítulo VI – Trabalho adicional desenvolvido na empresa, apresenta-se de forma resumida todo o trabalho feito na empresa, suplementar ao tema do estágio.

Capítulo II – Soldadura de ligas de alumínio

II.1 – Alumínio e as suas ligas

O alumínio é o segundo metal mais abundante na crosta terrestre, surgindo sob a forma de hidróxidos e aluminossilicatos, sendo extraído principalmente a partir de bauxite. Atualmente a produção de alumínio assenta em dois processos de fabrico complementares: Processo Bayer e Processo Hall-Héroult.^[3] A evolução deste material na indústria mecânica deve-se principalmente aos seguintes fatores: elevada relação resistência mecânica/peso, baixa densidade (cerca de três vezes menor que a do aço), elevada condutividade térmica e elétrica, elevado coeficiente de expansão térmica, Tabela 1, além de elevada resistência à corrosão.^[1]

Tabela 1: Comparação de propriedades entre o alumínio e o aço.^[4]

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço-carbono
Massa específica (g/cm ³)	2,7	7,86
Temperatura de fusão (°C)	660	1500
Módulo de elasticidade (GPa)	70	205
Coeficiente de expansão térmica α (°C ⁻¹)	22x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶
Condutividade térmica (W/m.K)	230	47
Condutividade elétrica (S/m)	36,9x10 ⁶	5,9x10 ⁶

Mesmo possuindo ductilidade elevada, as principais limitações do alumínio puro referem-se à resistência mecânica e dureza, que são relativamente baixas mas podem ser melhoradas pela adição de elementos de liga, sendo os principais: cobre (Cu), magnésio (Mg), manganês (Mn), silício (Si) e zinco (Zn).^[1,2] Na Tabela 2 estão descritos os efeitos gerais da adição de cada elemento de liga ao alumínio.

As ligas de alumínio são classificadas em dois grupos distintos: as ligas de fundição e as ligas para trabalho mecânico. Apenas as ligas para trabalho mecânico serão detalhadas por se tratarem da matéria-prima utilizada no presente estudo. A designação proposta pela Aluminium Association (AA) para classificar estas ligas é apresentada na Tabela 3. A identificação da liga é feita através de um sistema numérico, contendo quatro algarismos em sequência.

- O primeiro dígito (1 a 8) indica a série que a liga de alumínio pertence;
- O segundo dígito, se diferente de zero, indica uma modificação na liga original;
- O terceiro e quarto dígitos identificam a composição específica e para o caso da liga 1XXX indicam a percentagem de alumínio.^[3,5]

No presente trabalho serão abordadas apenas duas das famílias de ligas de alumínio: 6XXX e 4XXX.

Tabela 2: Efeitos gerais da adição dos principais elementos de liga.^[5]

Elemento	Efeito na liga
Cobre	Confere alta resistência mecânica.
Silício	Diminui o ponto de fusão e dá fluidez à liga. Quando combinado com o magnésio obtêm-se ligas com boa resistência mecânica, plasticidade e extrudabilidade.
Manganês	Atua no sentido de oferecer um aumento moderado na resistência mecânica aliado a uma excelente ductilidade.
Magnésio	Oferece maiores resistências mecânicas e mantém boa resistência à corrosão.
Zinco	Aliado ao cobre e magnésio oferecem resistências elevadas. Combinado com magnésio são capazes de recuperar parte da resistência mecânica perdida através da soldadura por meio de envelhecimento natural.
Ferro	Este elemento possui um efeito negativo na extrudabilidade, na tenacidade e na sensibilidade à têmpera para a resistência da liga. No processo de homogeneização deve-se ter em conta que o ferro é prejudicial nos acabamentos de superfícies.

Tabela 3: Designação das ligas de alumínio para trabalho mecânico.

Designação	Composição
1XXX	Alumínio não-ligado com mínimo 99% de pureza
2XXX	Al + Cu
3XXX	Al + Mn
4XXX	Al + Si
5XXX	Al + Mg
6XXX	Al + Mg + Si
7XXX	Al + Zn + Mg
8XXX	Al + outros elementos

Ligas 6XXX

As ligas mais comuns são 6063, 6082 e 6061, (ver Tabela 4).^[6,7] Existem razões para utilizar estas ligas para o fabrico de quadros de bicicleta, dado que esta liga tem um baixo custo, está facilmente disponível no mercado e possui propriedades vantajosas para esta aplicação. Além das características relacionadas com a facilidade de extrusão, estas ligas têm elevada resistência à corrosão, boa formabilidade, são de fácil maquinação e têm uma boa soldabilidade. Apesar desta última característica ser adequada, este tipo de liga pode sofrer uma perda de dureza na junta soldada, devido ao calor desenvolvido durante o processo de soldadura. Para recuperar a resistência na zona termicamente afetada (ZTA) e na junta soldada é necessário executar tratamentos térmicos pós-soldadura.

Tabela 4: Composição química das ligas 6XXX mais comuns, em percentagem. ^[8]

Composição química (%peso)									
Liga	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Outros
6063	97,5 – 98	0,3 – 0,6	0,4 – 0,6	0,1 – 0,3	0,1	0,3	0,05	0,15	0,25
6082	97 – 95	0,7 – 1,3	0,6 – 1,2	0,5	0,1	0,4 – 1	0,25	0,2	0,1
6061	97 – 96	0,4 – 0,8	0,8 – 1,2	0,7	0,15 – 0,4	0,15	0,04 – 0,35	0,25	0,30

Ligas 4XXX

Embora a zona termicamente afetada seja propensa à fissuração a quente, este problema pode ser superado pela escolha correta do metal de adição. ^[1,3] Esta é um das razões que levam à adição de silício em maior quantidade nas ligas 4XXX, sendo também a temperatura de fusão destas ligas mais baixa, apresentando o líquido uma excelente fluidez. Neste trabalho a composição química utilizada é a da liga 4043 (Tabela 5).

Tabela 5: Composição química da liga 4043 (metal de adição). ^[8]

Composição química da liga 4043 (% peso)							
Al	Si	Mg	Mn	Ti	Fe	Cu	Zn
94 - 93	4,5 - 6	0,05	0,05	0,1	0,8	0,3	0,1

II.2 – Tratamentos térmicos de ligas de alumínio

Na Figura 2 apresenta-se o diagrama de equilíbrio pseudo-binário da liga Al-Mg-Si (ligas 6XXX) dada a relevância da sua compreensão para o estudo dos tratamentos térmicos, objeto do presente trabalho. ^[9] Este evidencia o campo monofásico α , uma solução sólida de Al-Si-Mg rica em alumínio, limitada pelas linhas *solvus* e *solidus*. Para um teor de 1,0% de Mg_2Si a 500 °C, por exemplo esta é a fase sólida estável. Quando é feito um arrefecimento rápido em água, a solução sólida mantém-se à temperatura ambiente mas sobressaturada. Os tratamentos térmicos de endurecimento deste tipo de ligas baseiam-se na conjugação das características termodinâmicas (diagrama de fases) e cinética das transformações de fase, iniciando-se normalmente com a etapa de solubilização.

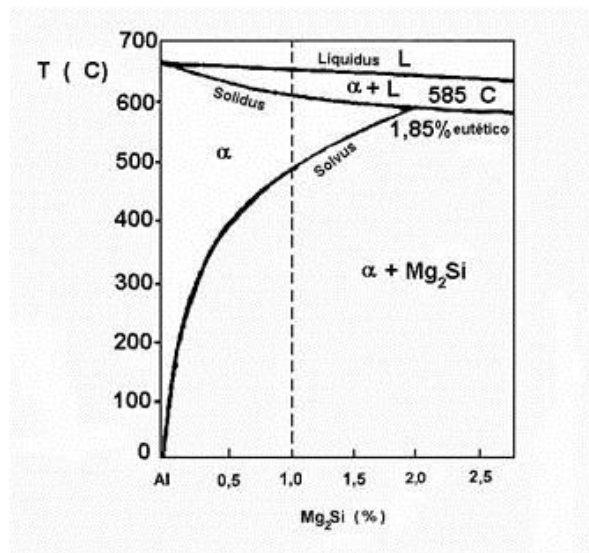


Figura 2: Diagrama pseudo-binário Al-Mg₂Si.^[9]

A solubilização consiste em aquecer o material a uma temperatura relativamente próxima da temperatura de fusão, de tal modo que seja possível a interdifusão atômica completa, proporcionando a dissolução completa dos elementos de liga na fase α . Após o arrefecimento forçado (têmpera), a liga fica sobressaturada. Esta etapa é fundamental para o envelhecimento subsequente, realizado a temperaturas muito mais baixas do que a solubilização e com tempos mais prolongados. Posteriormente, mantendo o material à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou a uma temperatura mais elevada (envelhecimento artificial) ocorre a formação de precipitados endurecedores. Deste modo a matriz de alumínio é reforçada pela precipitação dos elementos liga na forma de compostos intermetálicos cuja coerência com a matriz, tamanho e distribuição são cuidadosamente controlados. No envelhecimento natural a cinética de precipitação é mais lenta do que no envelhecimento artificial, cujo controle de temperatura e tempo permite uma obtenção de valores de dureza mais elevados. No envelhecimento artificial é possível atingir o máximo de dureza para um determinado tempo de tratamento, após o qual, o crescimento excessivo dos precipitados e a consequente perda de coerência dos mesmos com a matriz leva a redução de dureza, fenómeno denominado sobre-envelhecimento.^[10]

As ligas de alumínio podem diferenciar-se entre ligas tratáveis termicamente (ligas 2XXX, 6XXX, 7XXX e a maioria das ligas 8XXX), que obtêm endurecimento por meio de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, e aquelas cujo aumento de dureza só pode ser obtido mediante trabalho mecânico e consequentemente encruamento (ligas 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX). No sentido de identificar os tratamentos térmicos sofridos pelo metal, são adicionadas à designação da liga uma letra maiúscula com um ou mais dígitos como por exemplo, a liga 6063 – T6. Existem vários significados associados às letras possíveis de encontrar na identificação de uma liga de alumínio tratada térmica e/ou mecanicamente, como é possível verificar nas Tabelas 6 e 7, segundo a notação adotada pela AA.

Tabela 6: Designação dos tratamentos sofridos pelo alumínio. ^[5]

Designação	Descrição
F	Como produzido, sem propriedades garantidas, aplica-se aos produtos resultantes de conformação mecânica (laminação, extrusão e outros). Não efetua qualquer controlo nas condições de endurecimento térmico ou por encruamento.
O	Recozimento de recristalização. Aplica-se tanto às ligas para trabalho mecânico como para as ligas de fundição. Permite aumentar a ductilidade e a estabilidade dimensional mas corresponde ao valor mais baixo de resistência mecânica.
H	Tratamento mecânico levando ao encruamento. Poderão ou não, ser complementados por tratamentos térmicos para originarem uma relaxação na estrutura e logo uma redução na resistência mecânica. O “H” é sempre seguido por dois ou mais dígitos.
W	Tratamento de solubilização. Liga sujeita a envelhecimento natural, à temperatura ambiente.
T	Tratamento térmico com ou sem encruamento suplementar. Para produzir um endurecimento estável.

Tabela 7: Subdivisões do estado metalúrgico T segundo a AA ^[11]

Tratamento	Descrição
T1	Arrefecimento desde a temperatura de enformação a quente, seguido de envelhecimento natural.
T2	Arrefecimento desde a temperatura de enformação a quente, seguido de trabalho a frio e envelhecimento natural.
T3	Tratamento térmico de solubilização seguido de trabalho a frio.
T4	Tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento natural.
T5	Arrefecimento desde a temperatura de enformação a quente, seguido de envelhecimento artificial.
T6	Tratamento térmico de solubilização, seguido de envelhecimento artificial.
T7	Tratamento térmico de solubilização, seguido de estabilização (sobre-envelhecimento artificial)
T8	Tratamento térmico de solubilização, seguido de trabalho a frio e envelhecimento artificial.
T9	Tratamento térmico de solubilização, seguido de envelhecimento artificial e trabalho a frio.
T10	Arrefecimento desde a temperatura de enformação a quente, seguido de trabalho a frio e envelhecimento artificial.

De seguida apresenta-se em formato tabela as propriedades mecânicas da liga 6063 com diferentes tratamentos térmicos, Tabela 8.

Tabela 8: Propriedades mecânicas da liga 6063 em diferentes tratamentos térmicos. ^[12]

Tratamento	Tensão de cedência (MPa)		Tensão de rutura (MPa)		Alongamento ^(*) (%)		Dureza	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	HB	HV
O	-	50	-	100	-	26	25	25
T1	-	90	-	150	-	24	45	45
T4	-	90	-	160	-	21	50	50
T5	110	175	150	215	8	13	60	65
T6	170	210	205	245	10	12	75	80
T8	-	240	-	260	-	9	80	85

^(*) Extensão permanente do comprimento de medida inicial (L_0) expresso em percentagem, onde $L_0=50$ mm

II.2.1 – Tratamento de endurecimento por precipitação

O tratamento de endurecimento por precipitação ocorre em duas etapas: solubilização e envelhecimento. Tem como objetivo a obtenção de precipitados finos mas com dimensão suficiente para agirem como obstáculos ao movimento das deslocações, endurecendo a liga. Com a solubilização garante-se a obtenção de uma solução sólida que é arrefecida rapidamente até à temperatura, o permite controlar a nucleação e o crescimento dos precipitados durante o posterior envelhecimento. No início do envelhecimento surgem aglomerados de átomos de soluto, as chamadas zonas de Guinier-Preston (GP), Figura 3, evoluindo para precipitados metaestáveis, inicialmente coerentes (θ'') e posteriormente semicoerentes (θ'). A falta de coerência destes precipitados com a matriz, ao provocar distorções na mesma, devido a pequenas diferenças de parâmetro de rede, gera um campo de tensões que dificulta a movimentação das deslocações, endurecendo o material. Prolongando o envelhecimento para tempos excessivos, os precipitados coalescem (θ), deixando um elevado percurso livre médio para o movimento das deslocações, resultando numa diminuição de dureza (sobre-envelhecimento), Figura 3. ^[13] Para o caso das ligas 6XXX, o envelhecimento ocorre com a seguinte sequência: solução sólida supersaturada \rightarrow GP \rightarrow β'' \rightarrow β' \rightarrow β (Mg_2Si).

No envelhecimento artificial (realizado em forno) o pico de dureza pode ser obtido em algumas horas (tanto mais rápido quanto mais alta a temperatura), enquanto no envelhecimento natural o máximo de dureza é inferior ao obtido em forno e só é atingido após cerca de uma semana ou mais de manutenção do material à temperatura ambiente. ^[10,14]

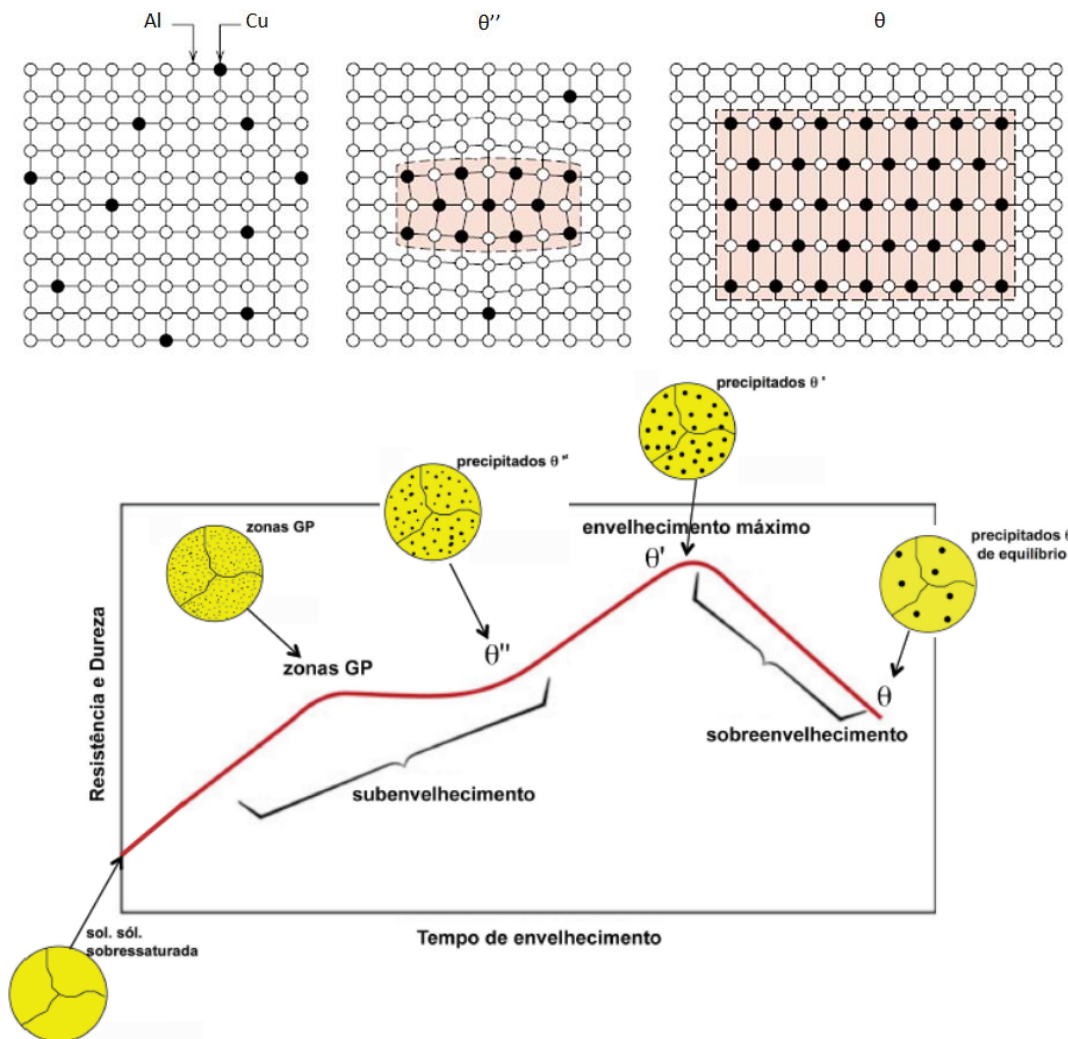


Figura 3: Resistência e dureza vs tempo de envelhecimento, de acordo com a coerência e incoerência dos precipitados com a matriz, para a liga Al-Cu. ^[11,13]

II.2.2 – Recozimento

As ligas de alumínio podem ter a sua dureza reduzida por meio de tratamento térmico de recozimento (O), que leva à recuperação e recristalização do material anteriormente endurecido. O tipo de recozimento a ser realizado numa liga depende da sua história termomecânica prévia e do tipo de microestrutura resultante dessas operações anteriores. Para o caso das ligas endurecíveis por precipitação é necessário um controle de temperaturas mais cuidadoso, para evitar a ocorrência de precipitação durante este tratamento. ^[11]

II.3 – Soldadura

A soldadura é um dos processos mais efetivos de união de materiais, no entanto é também um dos mais complexos, devido à grande variedade de fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante a sua realização, num curto espaço de tempo. ^[5]

Os processos de soldadura por arco elétrico com proteção de gás inerte (MIG- *Metal Inert Gas Welding*, e TIG- *Tungsten Inert Gas Welding*) são os mais utilizados na soldadura do alumínio, sendo o processo MIG preferido em relação ao processo TIG quando utilizados em aplicações estruturais, como no caso dos quadros de bicicleta. O processo MIG destaca-se pela facilidade com que pode ser automatizado, sendo utilizado tanto em sistema automático como semi-automático, sendo por isso um processo de alta produtividade. Além destas, possui outras vantagens, tais como: grande versatilidade quanto ao tipo e espessura dos materiais a serem aplicados, soldadura em todas as posições se forem escolhidos gases de proteção adequados, elétrodos consumíveis e utilizando parâmetros de soldadura apropriados, permite maiores profundidades de penetração e zonas termicamente afetadas mais estreitas. Mas também apresenta algumas dificuldades comparado com o processo TIG como a maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldadura, a exigência de um ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter a soldadura com as características desejadas. Na soldadura MIG a variedade de elétrodos consumíveis é menor e a manutenção de equipamento tem um maior custo.^[1,2]

O processo MIG, por ser o utilizado no âmbito deste trabalho, será discutido mais detalhadamente nas secções seguintes.

II.3.1 – Processo de soldadura MIG - *Metal Inert Gas*

O processo de soldadura MIG é um processo de soldadura por fusão com adição de material, onde a fusão do metal de adição (elétrodo consumível em formato de arame e alimentado continuamente) e do material base é obtida através do calor desenvolvido por um arco elétrico, formando um banho de fusão (metal fundido). A proteção do banho de fusão, das gotas do material de adição e do cordão de soldadura, é obtida através de uma proteção gasosa inerte.^[15]

II.3.1.1 – Equipamento

A Figura 4 representa esquematicamente este processo e o equipamento base necessário. Este equipamento consiste basicamente de uma fonte de energia, um sistema de alimentador de arame, uma tocha que pode ser atuada automaticamente ou manualmente, e um sistema de fornecimento do gás de proteção.^[15]

Tocha

A tocha é constituída por uma guia responsável pela condução do elétrodo consumível, a qual é revestida a nylon, teflon ou outro material de baixo coeficiente de atrito pois este deve prevenir a deformação do fio elétrodo; de uma canalização, que com o bocal, conduz o gás de proteção ao banho de fusão; um condutor de corrente (também chamado de elétrodo); e de um bico de contacto. Este último elemento é fabricado em cobre ou liga de cobre.^[2]

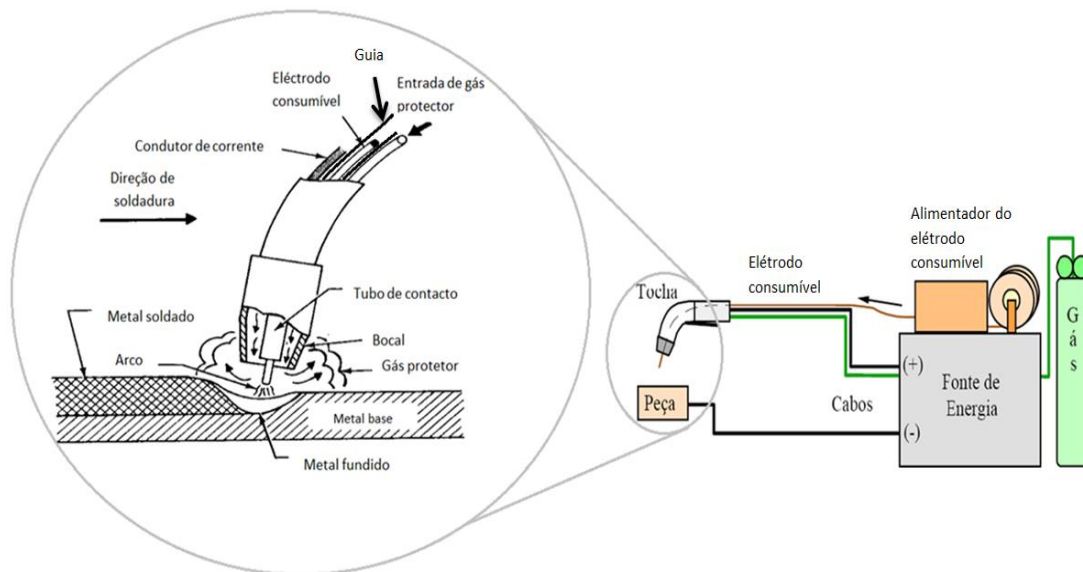


Figura 4: Esquema de equipamento para soldadura MIG.^[15]

Sistema de alimentação

O sistema de alimentação do eletrodo consumível é constituído por um conjunto de roletes de tração e por um motor de corrente contínua com velocidade de rotação ajustável comandado pela fonte. A escolha incorreta dos roletes de alimentação do fio é uma das principais causas de problemas de soldadura. A grande maioria desses problemas é causada por aparas de alumínio do fio que se originam devido a deficiente montagem dos roletes ou a sua incorreta conceção. A rugosidade, a inclusão de arestas no rolete e o desalinhamento dos rolos podem danificar o fio do metal de adição produzindo uma acumulação de aparas e agregados finos. Esta acumulação sobre os rolos de alimentação causa uma distorção do fio, uma má alimentação e uma instabilidade do arco. A fim de impedir a deformação do fio durante a alimentação é necessário polir todas as superfícies do sulco, garantir que ambos os rolos estão alinhados, utilizar sempre a menor pressão possível do rolo e usar sempre que possível a combinação do sistema impulsão-tração ("push-pull").^[2,6]

Fonte de alimentação

A fonte de energia fornece a tensão e a corrente elétrica necessária para o processo. Geralmente neste processo, utiliza-se em polaridade inversa, ou seja, corrente contínua, o eletrodo está ligado ao polo positivo e o material a soldar ao negativo. Tem como vantagem concentrar o calor resultando numa elevada eficiência térmica. Este tipo de ligação caracteriza-se por um arco elétrico estável, transferência metálica suave, poucos respingos, um cordão de soldadura de boa aparência e promove uma maior penetração.^[2,3,7]

II.3.1.2 – Materiais consumíveis

No processo de soldadura MIG são considerados materiais consumíveis o metal de adição e o gás de proteção. Nesta secção também se abordará o modo de transferência do

metal de adição pois esta é diretamente influenciada pelo tipo de gás empregue e pela configuração da peça a soldar. [2,3,6]

Gás de proteção

O gás de proteção tem como função proteger a área de soldadura dos gases atmosféricos que podem causar defeitos de fusão, porosidade e consequentemente uma fragilização da soldadura caso entrem em contacto com o metal de adição, o arco elétrico ou o banho de fusão. Os gases de proteção devem ainda ajudar a proporcionar um arco estável e uma transferência metálica uniforme, visando aumentar o desempenho e produtividade e diminuir os riscos de defeitos. O processo MIG utiliza como gases inertes o árgon ou misturas de hélio e árgon. O tipo de gás de proteção influi no modo de transferência do metal, no formato do arco e no tipo de cordão de soldadura, Figura 5.

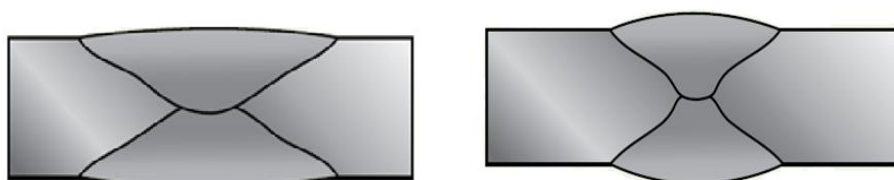


Figura 5: Influência do tipo de gás no cordão de soldadura, à esquerda por hélio+árgon e à direita por árgon. [6]

Normalmente, a escolha do gás de proteção é baseada no custo e qualidade da soldadura desejada. Muitas vezes justifica-se o uso de um gás de alto custo tendo em vista os benefícios que ele pode trazer, como uma maior taxa de deposição ou uma redução na correção da soldadura. O árgon é usado na maioria das soldaduras semi-automáticas e em algumas automáticas porque permite uma boa penetração e limpeza da soldadura e por ser o mais económico. Este produz um cordão de soldadura mais estreito comparado com o cordão produzido com o gás de proteção de hélio que gera um perfil de fusão mais largo no contorno de penetração, Figura 5. Esta particularidade acontece devido ao potencial de ionização do hélio ser mais alto do que o do árgon, aproximadamente 25 eV e 16 eV respetivamente.

O fluxo de gás ideal depende principalmente da geometria da peça a soldar, velocidade da soldadura, do tipo de gás e do modo de transferência de metal. Soldar superfícies planas (topo-a-topo ou sobrepostas) requer um fluxo superior à soldadura de peças com juntas em 'T' (Figura 6), por exemplo, já que o gás se dispersa mais rapidamente. [2,6,7]

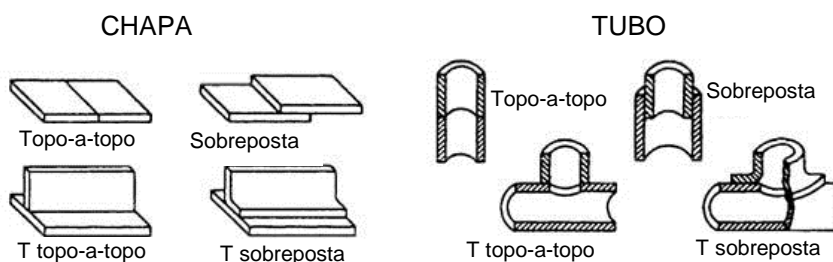


Figura 6: Tipos de juntas mais comuns em chapas e em tubos. [16]

Como o argon tem maior densidade que o ar, permite uma excelente cobertura de gás de proteção na posição plana. A adição de hélio aumenta o potencial de ionização e a condutividade térmica do gás que transporta mais calor através do arco para o metal base. Esta característica faz com que haja um aumento na penetração de soldadura e na largura da soldadura, com porosidade reduzida no cordão de soldadura, Figura 5. A utilização da mistura de gás argon-hélio traz desvantagens pois este necessita taxas de fluxo maiores devido à menor densidade do gás e um aumento do custo. ^[6]

Modo de transferência do metal de adição

O modo de transferência é a maneira pela qual o metal fundido se desloca a partir da extremidade do eletrodo consumível em todo o arco de soldadura em relação à peça e é determinada pela espessura do material a ser soldado e a dimensão do metal de adição. ^[6]

A forma como a gota de metal é transferida do eletrodo consumível para o banho de fusão (modos de transferência metálica) afeta muitas características do processo, como por exemplo: a quantidade de gases absorvidos pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldadura e o nível de respingos gerados. ^[2] De forma geral existem três formas básicas de transferência: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência *spray*, Figura 7. Os modos de transferência por *spray*, transferência por *spray* pulsado e por transferência de metal frio por curto-circuito (*Cold Metal Transfer*, CMT), por serem utilizados neste trabalho, serão discutidos mais detalhadamente nos tópicos seguintes.

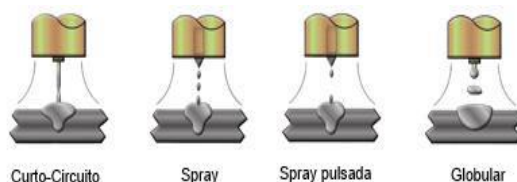


Figura 7: Modos de transferência do metal. ^[17]

Transferência por spray

Este é um modo de transferência em que o metal fundido a partir do eletrodo consumível é propulsionado com precisão em todo o arco em pequenas gotículas. É caracterizado pela sua elevada geração de calor, arco estável, cordão de soldadura liso e poucos respingos. Como tem uma geração de calor muito elevada, consegue ultrapassar as taxas de dissipação térmica devidas à alta condutividade térmica do alumínio, sendo considerado o modo de transferência ótimo para a soldadura de alumínio através do processo MIG. ^[6]

Transferência por spray pulsado

O *spray* pulsado é uma variação do modo de transferência por *spray*. É baseado nos princípios de operação por *spray* mas utiliza uma corrente pulsada para fundir o eletrodo consumível permitindo que caia uma pequena gota em cada impulso. Os impulsos permitem

que a corrente seja menor, diminuindo a geração de calor e, consequentemente, a diminuição da zona termicamente afetada no processo e o tamanho do banho de fusão. [7]

Cold Metal Transfer (CMT)

O processo *Cold Metal Transfer (CMT)* possibilita o controlo do arco elétrico em modo pulsado alternadamente com o curto-circuito de contacto. Este processo, descrito esquematicamente na Figura 8, utiliza um sistema de alimentador de fio integrado com um controlador digital de alta velocidade, de modo a permitir controlar o arco elétrico durante a soldadura, o método de transferência do metal e a quantidade de energia térmica transferida para o material base. Numa primeira fase, uma tensão constante e um elevado pulso inicial de corrente gera o arco elétrico entre o eléctrodo e o material base. Posteriormente a corrente é reduzida para que a gota não vá diretamente para o material base, mas sim que se crie um globo de material fundido ainda fixo à ponta do eléctrodo. Na fase de fusão, o próprio arco elétrico sobe a temperatura por um curto período de tempo, razão pela qual a transferência térmica é menor. Na fase de curto-circuito, o eléctrodo é alimentado em direção ao fundido iniciando o curto-circuito elétrico representado pela redução da tensão do arco. Quando a gota atinge o fundido, é enviado um sinal para o alimentador do fio que altera o seu sentido do movimento. Esta força de retração no fio auxilia a libertação da gota e o seu fluxo para zona fundida. O resultado é uma transferência de material isenta de respingos. [19,20]



Figura 8: Transferência do metal de adição por CMT. [19,20]

Metal de adição

Geralmente na forma de fio ou fita, é um componente com duas funções importantes no processo de soldadura. A primeira é atuar como ânodo na formação do arco de soldadura e a segunda é ser a liga de enchimento na soldadura. A seleção deste metal baseia-se na composição química do metal base, na geometria da junta e nas condições de superfície do material, na fluidez do metal de adição, na tendência ou não à fissuração a quente, no comportamento da soldadura a temperaturas elevadas e na resistência à corrosão. Uma seleção adequada é um fator chave na qualidade da soldadura pois o metal de adição tem uma grande influência nas suas propriedades mecânicas. Se for necessário uma anodização após

soldadura, também é importante a seleção correta do metal de adição para combinar com a cor do metal base após este processo.

Em 85% das soldaduras em alumínio são utilizados como material de adição a liga 4043 ou a 5356, pois estão disponíveis no mercado e são menos dispendiosas. A liga 4043, que foi desenvolvida para a soldadura de ligas tratáveis termicamente, é menos sensível à fissuração da soldadura com metais base da série 6XXX, além de possuir um ponto de fusão mais baixo e fluidez melhor quando comparada com as ligas 5XXX.^[2,6]

Quando um metal de adição é utilizado, o banho de fusão da soldadura é uma mistura do metal de adição e do metal base, e as propriedades desta 'nova' liga determina até certo ponto as propriedades do cordão de soldadura que são influenciadas pelo grau de diluição do metal de adição no metal base. Terminado o processo, o metal da soldadura deve ter propriedades mecânicas semelhantes às do metal base, sem defeitos (descontinuidades, impurezas ou porosidade no interior da soldadura).^[2,7]

II.3.1.3 – Parâmetros do processo de soldadura MIG

Além dos parâmetros que já foram referidos anteriormente e que são definidos aquando da escolha do material e da sua geometria, cada uma das seguintes variáveis também afeta as características do cordão de soldadura, como a penetração, a altura e largura do cordão, a taxa de deposição, além das características microestruturais.

Intensidade de corrente

A intensidade de corrente influencia o modo de transferência do metal, isto é, controla a taxa de deposição, o tamanho e formato do cordão de soldadura e penetração. Quanto maior a intensidade de corrente, maior será a taxa de deposição. O aumento da corrente aumenta a profundidade e largura de penetração, bem como o tamanho de cordão de soldadura.^[3,5]

Tensão do arco elétrico (comprimento do arco)

A maioria das aplicações de soldadura por arco elétrico com gás de proteção usa uma tensão constante, como resultado, qualquer alteração no comprimento do arco (que está diretamente relacionada com a tensão) resulta numa grande alteração na entrada de calor e corrente. Assim o seu aumento vai provocar uma maior largura no cordão e uma redução da penetração. Existe, no entanto, uma relação entre a tensão e intensidade que deve ser respeitada para que o arco elétrico seja estável.

Velocidade de soldadura

A velocidade de soldadura é a velocidade de deslocação do arco elétrico ao longo da junta. O aumento da velocidade causa a diminuição da quantidade de calor transmitido ao metal base e conseqüentemente diminui o tamanho da zona termicamente afetada, a penetração e a largura do cordão de soldadura.

Stickout

O *stickout* corresponde à extensão do eletrodo fora do bocal, Figura 9. A resistência elétrica do arame aumenta com o alongamento do eletrodo causando o aumento da temperatura do mesmo. Dessa forma, com o aumento do *stickout*, menores correntes são necessárias para fundir o eletrodo, com menor aquecimento do banho de fusão. Estes acontecimentos podem resultar numa taxa de deposição elevada, todavia de pobre penetração, comprometendo o desempenho da soldadura. A necessidade de manter uma distância de trabalho é importante, porque um *stickout* longo pode fazer com que o eletrodo entre em sobreaquecimento e também desperdice gás de proteção.^[2,5,7]

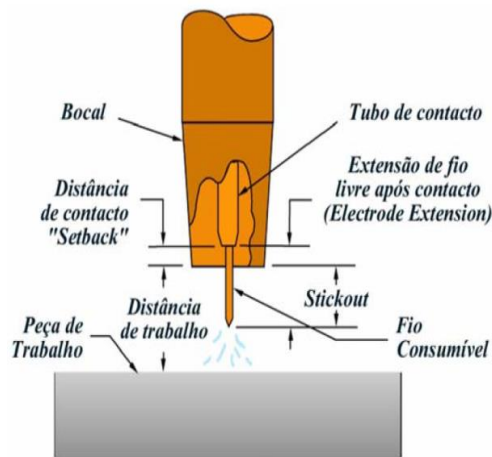


Figura 9: Esquema do bocal e da extensão do elétrodo. [7]

Posição da tocha

A posição da tocha é definida por dois ângulos: ângulo de trabalho e ângulo de deslocamento, Figura 10. O ângulo de trabalho é o ângulo que a tocha faz com o plano normal à superfície do metal base. Para soldar alumínio, este ângulo tem de ser mantido o mais próximo de 90° em relação à peça de trabalho quanto possível, para o caso da junta de topo-a-topo, Figura 6. O ângulo de deslocamento é o ângulo entre a tocha e a linha perpendicular ao eixo longitudinal da soldadura, também conhecido como o ângulo “a puxar” ou “a empurrar”. Este influencia a penetração e o tamanho do cordão de soldadura. Na soldadura em alumínio, este ângulo é utilizado na forma de empurrar o banho de fusão, de forma a evitar contaminações, aumentar a penetração e diminuir a transmissão de calor ao metal base. [3,5,15]

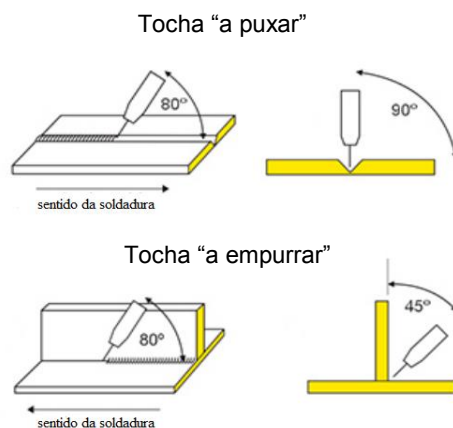


Figura 10: Ângulos de deslocamento e de trabalho da tocha. ^[12]

II.3.2 – Soldabilidade do alumínio e as suas ligas

O termo soldabilidade está associado à facilidade com que um metal pode ser soldado, produzindo juntas soldadas com resistência mecânica similar à do metal base, apresentar bom aspecto visual, resistência à corrosão e outras propriedades quando especificadas. ^[1,3] Boas práticas de limpeza são sempre importantes quando se solda alumínio: o nível de limpeza e preparação do metal necessárias para a soldadura depende do nível de qualidade desejada nas soldaduras. Soldaduras de alta qualidade são muito mais difíceis de obter no alumínio do que no aço. O alumínio proporciona mais problemas de qualidade da soldadura, tais como falta de fusão, falta de penetração e porosidade, do que o aço. ^[7]

Um dos grandes problemas na soldadura de alumínio está relacionado com a alta afinidade química entre o alumínio e o oxigênio que pode levar à formação de uma camada de alumina (Al_2O_3) nas peças a soldar e no material de adição. Este óxido tem uma dureza elevada e um alto ponto de fusão (2072 °C). Estas características aliadas a uma camada espessa poderão resultar em zonas não fundidas. A alumina é também porosa, podendo reter humidade e impurezas que podem contaminar o cordão de soldadura. Desta forma, é necessária a remoção/redução prévia desta camada por meios químicos ou mecânicos. A remoção por ação mecânica é feita por meio de esmerilagem ou escovagem, antes da soldadura. A limpeza química é feita por aplicação de bases e ácidos alternadamente, a temperaturas variadas, intercaladas por lavagem com água. ^[1,2,3] Pelas mesmas razões é necessário um fluxo de gás de proteção suficiente para que a soldadura ao ar (sem proteção) seja evitada. ^[8]

Outra causa da ocorrência de porosidade é a dissolução de hidrogénio na fase líquida e a sua posterior precipitação na forma molecular no seio do metal sólido, dada a grande diferença de solubilidade entre o estado líquido e o estado sólido, Figura 11. Existem várias fontes de hidrogénio no processo tais como a humidade atmosférica e as gorduras presentes na superfície da peça. O hidrogénio, como outros gases, quando em excesso, irá causar porosidades na zona soldada que contribuem para a redução de propriedades tais como a resistência mecânica, a ductilidade, a resistência à fadiga e a resistência à corrosão. ^[3,4,5]

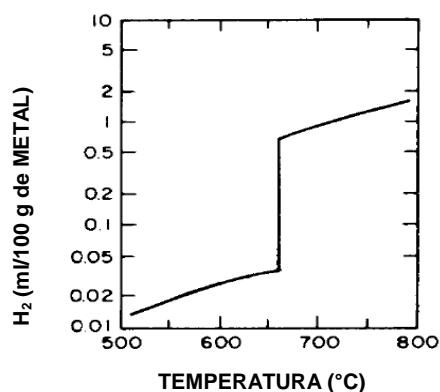


Figura 11: Solubilidade do hidrogênio no Alumínio. ^[5]

Outro fator que atua com grande influência na soldabilidade é a condutividade térmica. No caso do alumínio ela é quase cinco vezes superior à do aço, o que significa que para elevar localmente a temperatura de uma mesma massa, é requerido cinco vezes mais calor para o alumínio do que para o aço. Apesar do menor ponto de fusão do alumínio este provavelmente necessita tanto ou mais calor do que o aço para ser soldado. Além disso, o alto coeficiente de expansão térmica (quase duas vezes superior aos dos aços) associado à alta contração na solidificação (6% em volume), resulta em problemas de distorção e possivelmente fissuração dependendo da forma da estrutura soldada. Estes problemas deverão ser controlados através da sequência adequada de operações de soldadura e da correta fixação das peças. ^[1,3]

II.3.3 – Defeitos de soldadura

Na Tabela 10 e na Figura 12 podemos verificar alguns dos defeitos mais comuns que podem surgir no processo de soldadura e que podem enfraquecer o material nas suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, devido à escolha incorreta de parâmetros, materiais ou equipamento, entre outros.

Tabela 9: Alguns defeitos e as suas possíveis origens. ^[4]

Defeitos	Origem
Zonas não fundidas	Preparação; parâmetros
Picadas/Porosidade	Gorduras; humidade; falta de proteção; controlo da altura do arco
Inclusões	Limpeza; parâmetros
Fissuração	Problemas metalúrgicos; sequência
Excesso/falta de penetração	Parâmetros; técnicas operatórias

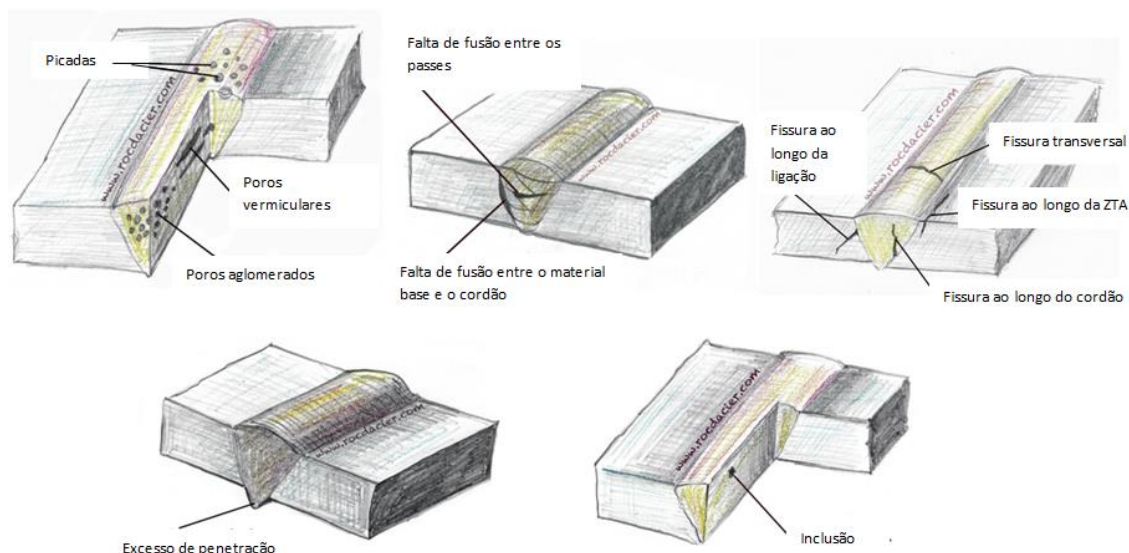


Figura 12: Alguns dos defeitos possíveis de encontrar no processo de soldadura. ^[14]

II.3.4 – Efeito do calor no processo de soldadura

A geração de calor a partir do arco elétrico aumenta a temperatura na junta de soldadura e nas regiões adjacentes do metal base. As variações de temperatura causam, além de fusão e solidificação do cordão de soldadura, variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas que podem resultar em efeitos negativos, tais como tensões residuais e distorção, alteração das propriedades mecânicas e formação de defeitos.

A zona termicamente afetada (ZTA) compreende as regiões do metal base cuja microestrutura ou propriedades foram alteradas pelas variações de temperatura durante o processo, Figura 13.^[5] Esta é uma região, adjacente à zona fundida, que durante o processo de soldadura não atingiu temperaturas suficientemente altas para fundir (total ou parcialmente), mas suficientemente altas para provocarem alterações microestruturais e apresentar propriedades muito diferentes das do metal base não afetado.

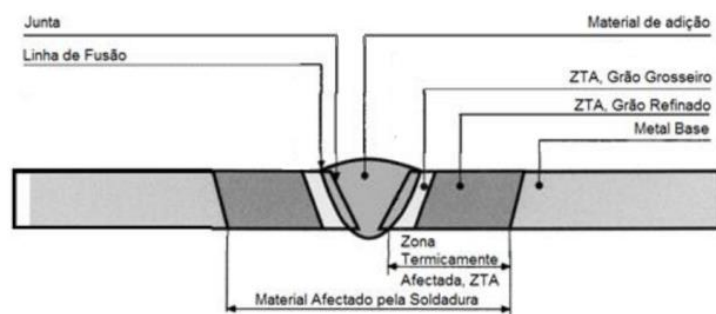


Figura 13: Diferentes regiões de um cordão de soldadura. ^[5]

Os parâmetros de soldadura podem interferir nas propriedades, na medida em que quanto maior for a entrega térmica mais extensa será a ZTA e maior será o tempo de permanência a alta temperatura, como se mostra na Figura 14. Deste modo cria-se uma

estrutura granular grosseira (zona B) adjacente à zona de fusão (zona A), que se prolonga para uma zona de grão fino na qual se dá um sobre-envelhecimento (zona C).

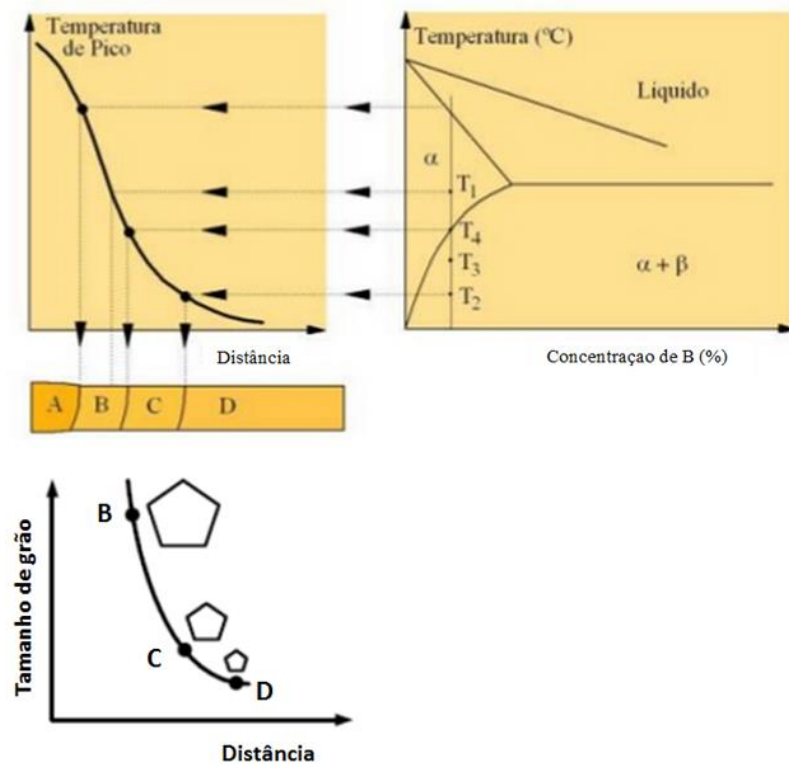


Figura 14: Diagrama esquemático da região de soldadura e da evolução do tamanho de grão. Região A – Zona fundida; Região B – ZTA a alta temperatura (grão grosseiro); Região C – ZTA a baixa temperatura (grão refinado) e Região D – Metal base não afetado.

Assim, a resistência mecânica e a dureza do material diminui do material base para o interior do cordão de soldadura, como se mostra na Figura 15. ^[5]

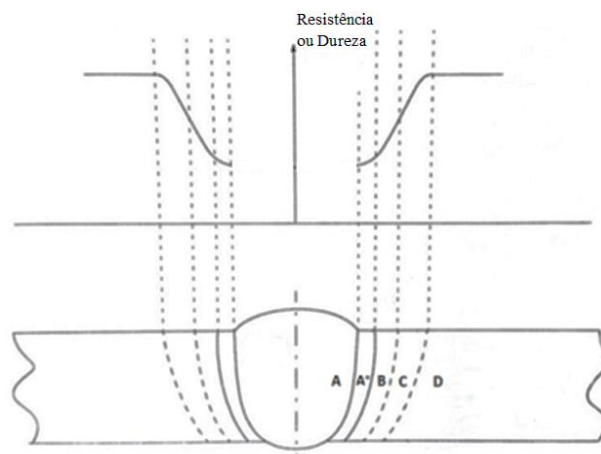


Figura 15: Esquema da resistência mecânica ao longo da junta, onde A⁺ representa a zona parcialmente fundida.

II.3.5 – Recuperação das propriedades mecânicas afetadas

Algumas medidas podem ser adotadas para minimizar a perda da resistência mecânica que ocorre durante o processo de soldadura nestas ligas:

1. Tratar termicamente (solubilização e envelhecimento) toda a estrutura. Apesar de ser a medida mais efetiva, para grandes estruturas é uma medida difícil de ser aplicada e de alto custo.
2. Soldar a peça na condição de solubilizada e envelhecer toda a peça após soldadura. Ao implementar esta medida a região C (Figuras 14 e 15) irá continuar com menor resistência;
3. Prever a perda de resistência e compensá-la com o aumento da espessura da peça na região da soldadura. Esta medida é raramente justificável devido aos altos custos de maquinação e perda de material;
4. Utilizar processos que permitam a realização da junta com uma menor entrada de calor e, portanto, com uma menor ZTA. ^[20]

Capítulo III – Produção e caracterização de provetes de alumínio soldados a MIG robotizado

A soldadura dos provetes de alumínio pelo processo MIG robotizado foi realizada na empresa MIRALAGO, que disponibilizou o equipamento e os materiais consumíveis necessários. Neste capítulo são descritos o processo de produção dos provetes de alumínio para soldadura e análise e as técnicas utilizadas para a sua caracterização realizadas na Universidade de Aveiro.

III.1 – Produção de provetes de alumínio

Tubos e fixação

Na realização deste trabalho, os procedimentos de soldadura foram executados em tubos de alumínio da liga 6063 com espessura de parede de 2 mm e diâmetros externos de 30mm e 40mm. A escolha das medidas da tubagem foi feita para que este estudo estivesse o mais próximo da sua finalidade, a soldadura de quadros de bicicleta. A preparação do material para soldar consistiu no corte dos tubos de Ø30 em 108,8mm de comprimento e dos tubos de Ø40 em 134mm de comprimento. Em seguida os tubos de Ø30 foram fresados numa das pontas em meia cana para realizar a junta pretendida, Figura 16(a). Para assegurar que a peça esteja na posição correta e que a tocha consiga efetuar uma soldadura completa de uma vez só, fez-se um estudo e construção do gabari mais adequado, Figura 16b. Com este novo componente o robô consegue fazer a aproximação à junta, iniciar e completar o percurso de soldadura e voltar à posição original numa só etapa.

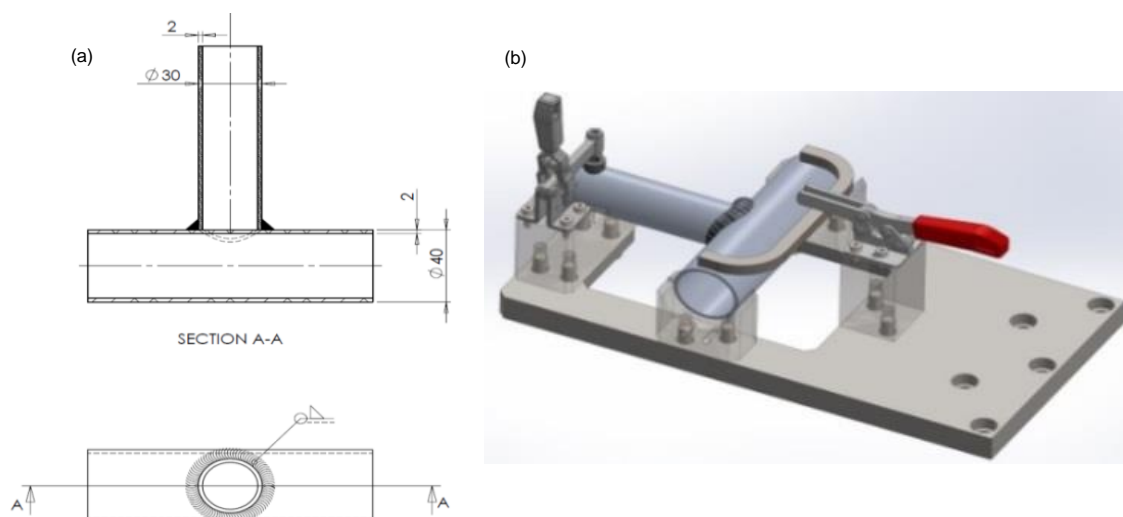


Figura 16: Ilustração da junta de soldadura (a) e do gabari de fixação dos tubos a soldar (b).

Após a realização destas etapas iniciais, fez-se a montagem do gabari na mesa do robô de soldadura.

Soldadura

Para a concretização deste trabalho foi utilizada uma célula robotizada Yaskawa Motoman com sistema de soldadura CMT incorporado Figura 17. O robô possui no total 8 graus de liberdade, 6 no próprio robô e 2 na mesa de trabalho, o que confere grande flexibilidade à operação de soldadura. Como gás de proteção foi empregado 100% Árgon e o fio de adição utilizado foi da liga 4043 com um diâmetro de 1 mm. Devido à espessura fina do fio e à sua composição, é necessário que o alimentador da tocha seja do mecanismo *push-pull*. O metal de adição foi transferido por *spray* pulsado e por CMT.

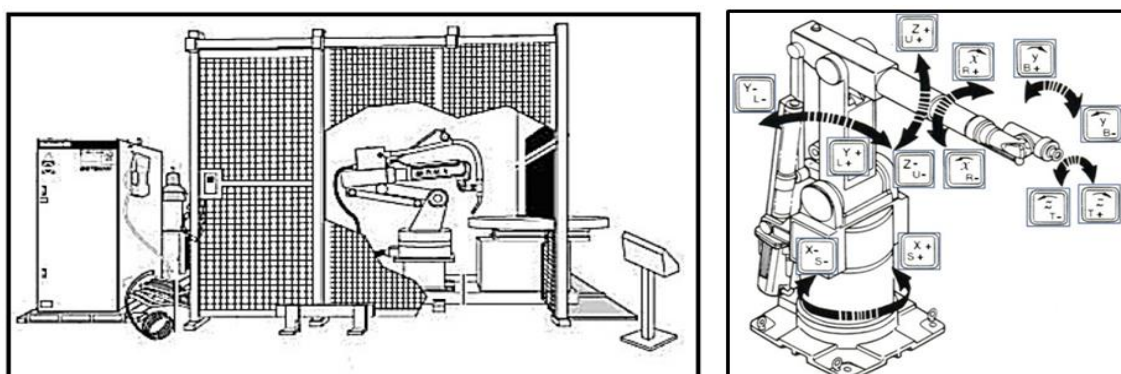


Figura 17: Esquema da célula de soldadura robotizada e dos seis movimentos do robot.

Antes de colocar as peças no gabari, foi feita uma limpeza inicial em alguns dos tubos mas não de forma sistemática pois uns provetes têm uma limpeza feita com álcool e escovado, outros apenas escovados. Os parâmetros utilizados para a soldadura dos provetes são referidos na Tabela 10. Os diversos provetes foram feitos recorrendo a um robô cujos programas foram sendo otimizados de provete para provete pelo programador. Daí não serem apresentados na tabela 10 a totalidade dos parâmetros, incluindo-se nestes a velocidade do movimento relativo da tocha e a sua trajetória em geometria orbital, variando os mesmos ao longo do cordão de soldadura.

Tabela 10: Parâmetros de soldadura utilizados.

Programa	Intensidade de corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação (m/min)
1	68	15,8	4,5
2	72	15,9	4,6
3	81	16,1	5,2
4	86	16,2	5,5
5	91	16,4	5,8
6	96	16,6	4,7

Foram produzidos 30 provetes cada um sujeito a uma sequência de programas, indicada na Tabela 11. Cada sequência tem uma variação na velocidade do movimento, no momento da transição do programa, na zona da trajetória em que se muda a velocidade, nos

ângulos de soldadura, o que justifica que haja mais do que um provete para cada sequência de programas, na maior parte dos casos. Na quarta linha da tabela 11 reúnem-se as condições de provetes produzidos com movimento pendular no ângulo de deslocamento da tocha. As soldaduras foram realizadas utilizando o processo *spray* pulsado ou o processo CMT (terceira e quarta linhas).

Esta grande variabilidade de condições de produção dos provetes deve-se à evolução empírica da programação por parte do operador, feita com base na experiência do mesmo e no aspeto visual dos provetes. Não foi deste modo possível condicionar a execução de ensaios numa base sistemática.

Tabela 11: Séries de provetes produzidos.

Nº Provette	Sequência de programas
1	(4) – (3) – (1)
2 a 15	(5) – (4) – (1)
16 a 20	CMT (6) – (4) – (2)
21 a 25 (pendular)	CMT (6) – (4) – (2)
26 a 30	(6) – (5) – (2)

Após a produção dos provetes, foi feita uma marcação das amostras com um punção, seguido de uma furação. Esta furação tem como objetivo evitar a acumulação de gases e humidade durante o tratamento térmico para homogeneização do material.

Tratamento térmico

A grande maioria dos provetes foi sujeita a um tratamento de solubilização e envelhecimento artificial (T6) após soldadura. De acordo com a *SAE Aerospace*, para espessuras de material entre 1,60 a 2,29 mm, foram definidos como tempo do patamar para a solubilização 35 minutos a uma temperatura de 525°C, seguido de um arrefecimento em água. [8,21] Usou-se um forno elétrico da *Ceramifor Kiln&Equipment* com temperatura máxima de 600°C e um volume útil de 7,5 m³, Figura 18.



Figura 18: Foto do forno para o tratamento de solubilização e provetes no suporte

Depois da solubilização foi efetuado o tratamento de envelhecimento artificial com duração total de 8h a 170°C. Foi necessário programar o forno para 178°C, para obter a temperatura pretendida nas peças (170°C). Após o patamar de 8h desligou-se o forno originando um arrefecimento lento dentro do mesmo. No forno utilizado (*Termolab*), o espaço disponível só permite colocar oito provetes e consequentemente foram necessárias três preparações para que todos os provetes definidos para T6 fossem tratados termicamente, Figura 19.



Figura 19: Forno para tratamento térmico de envelhecimento e posição dos provetes.

Os suportes dos provetes para os dois tratamentos foram produzidos na empresa Miralago. Na Figura 20 está representado graficamente o ciclo térmico completo. Apenas os provetes 25 e 29 não foram sujeitos a tratamento térmico. No esquema da Figura 21 resume-se o processamento a que as amostras foram sujeitas, desde a preparação dos tubos até aos tratamentos térmicos.

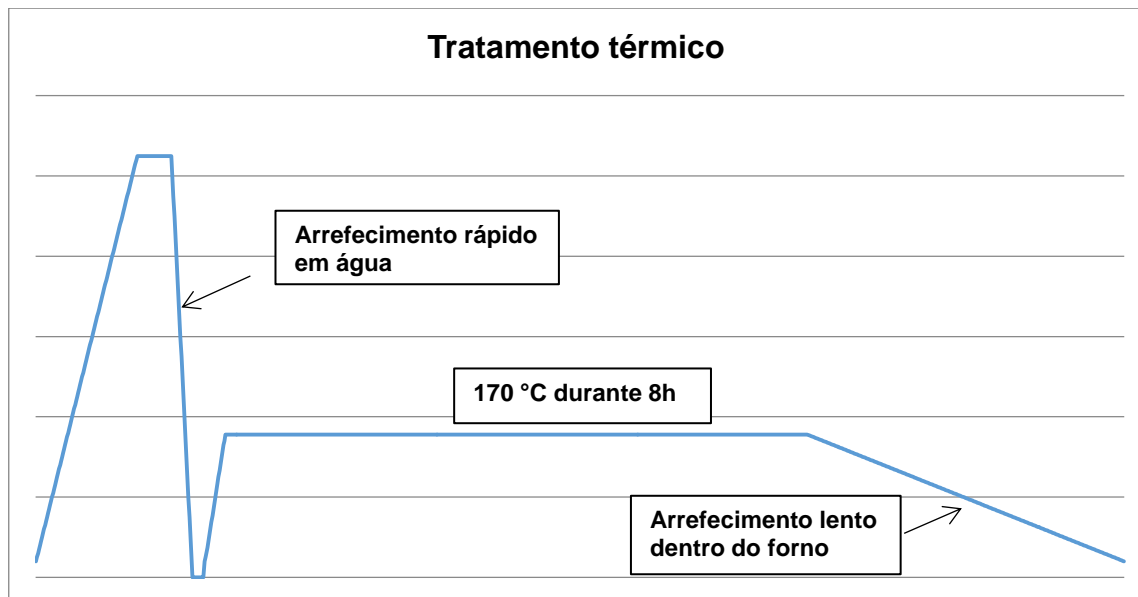


Figura 20: Representação gráfica do tratamento térmico feito aos provetes de alumínio.

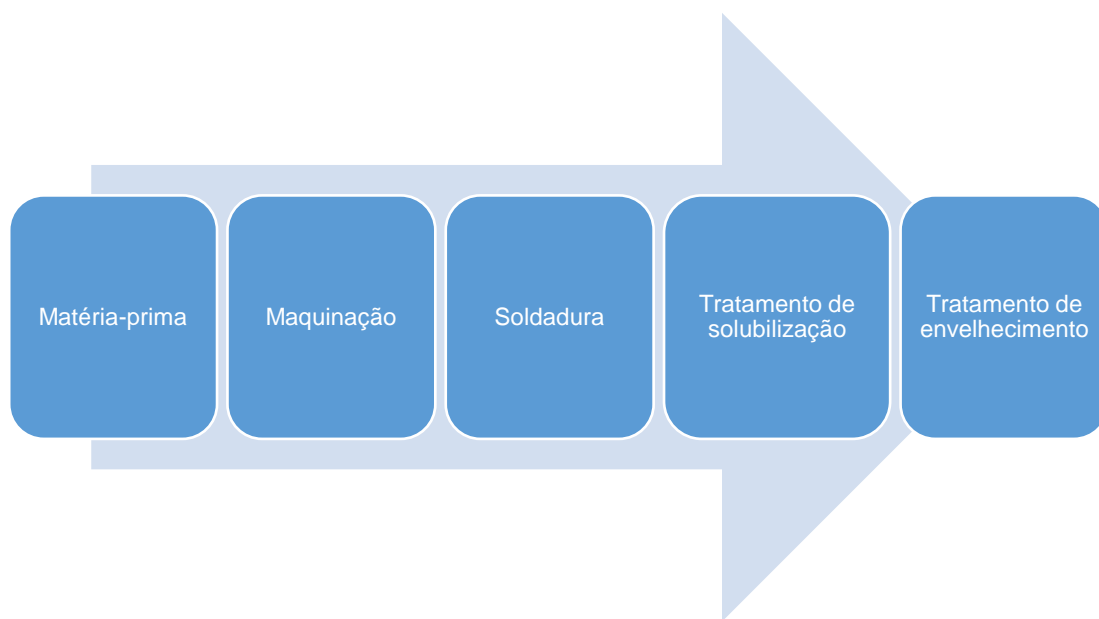


Figura 21: Resumo do processo de produção dos provetes.

III.2 – Técnicas de caracterização

III.2.1 – Análise macrográfica e micrográfica

Realizou-se uma análise metalográfica (macro e micro) a seis provetes de alumínio: dois provetes sem tratamento térmico (29 e 25) e quatro provetes com tratamento térmico (6, 11, 17 e 23). Esta permitiu visualizar os defeitos macroscópicos e observar a microestrutura do material podendo verificar-se a conformidade com a norma pretendida e garantindo a sua qualidade. A análise seguiu uma sequência de etapas: corte, embutimento, polimento, ataque químico, observação da microestrutura. Para se obter uma boa análise metalográfica é

necessário que os provetes sejam representativos de todo o material e deve ser feita uma análise macrográfica inicial para detetar defeitos e heterogeneidades superficiais.

Corte de provetes

Na etapa de corte, Figura 22, é necessário ter alguns cuidados pois más condições de corte podem levar a alterações da microestrutura do alumínio. Portanto o corte tem de ser feito por discos abrasivos com lubrificação, para evitar que a peça aqueça. Neste caso, o corte foi feito em quatro zonas, representadas na Figura 22 com os números de 1 a 4, para estudar a evolução ao longo do cordão da soldadura. A escolha do disco foi influenciada pela dureza e tamanho da amostra, tendo sido utilizado um disco de grãos abrasivos de alumina numa matriz polimérica e com lubrificação a água. Definiu-se a velocidade de rotação do disco de 3300rpm e uma velocidade de avanço de 0,120 mm/s.

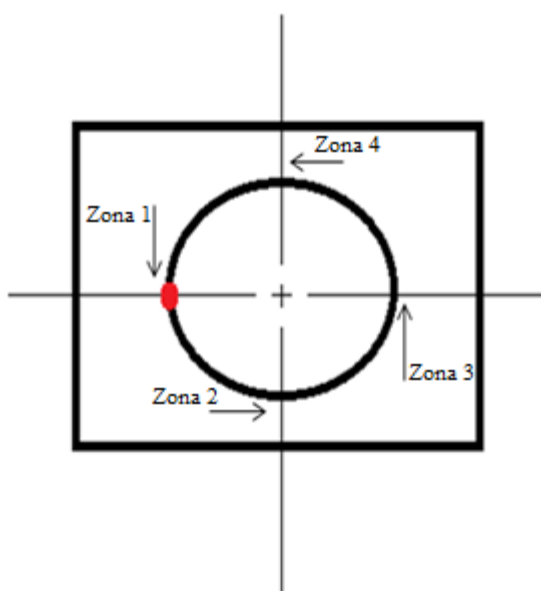


Figura 22: Zonas de corte: a zona 1 corresponde ao início de soldadura. Vista de topo do tubo de menor diâmetro

Embutimento

Após o corte, foi feito o embutimento da amostra para facilitar o manuseamento das peças e evitarem a danificação da lixa ou do pano de polimento. Este é feito a frio com uma resina à base de metil-metacrilato e um endurecedor, próprios para este tipo de embutimento. Mistura-se duas partes da resina acrílica em pó com uma parte do endurecedor em líquido e agita-se bem até não existirem bolhas de ar na mistura. O tempo de processamento é de 3 min seguido do vazamento para o molde de silicone, já com a peça na posição pretendida. O tempo de cura depende da temperatura ambiente, neste caso, cerca de 30 min.

Polimento e contrastação química

Depois da amostra embutida, a etapa seguinte foi o polimento em que o objetivo é conseguir uma superfície plana, sem riscos e brilhante para que seja possível, após o ataque químico, uma correta visualização da microestrutura do material. O polimento foi feito numa polideira e dividiu-se em dois tipos: polimento grosseiro e polimento fino. O polimento grosseiro tem como objetivo eliminar o excesso de material que se obteve com o embutimento e os riscos e marcas mais profundas da superfície a ser visualizada. Para retirar o excesso de material utilizaram-se as lixas P240 e P600. Utilizou-se em primeiro lugar a lixa com um tamanho de grão maior e com água que permite que os detritos fossem arrastados e não se incrustem na lixa permitindo que esta mantenha a sua característica abrasiva. Posteriormente ao polimento grosseiro, o provete deve ser limpo com água e álcool retirando detritos que possam ter ficado, e faz-se um polimento fino.

O polimento fino tem como objetivo obter uma superfície plana e brilhante para que não apresente riscos nem distorções quando observada microscopicamente para uma perfeita visualização da microestrutura. Foram utilizados panos macios com pasta de diamante de 6 e 3 μm e água destilada. Finalizou-se com um polimento final com pano de veludo e pasta de diamante de 1 μm , tendo a amostra no final do polimento o aspeto da Figura 23.



Figura 22: Amostra da zona 1, embutida em resina e polida

Depois do polimento foi executado um ataque químico que provoca um contraste ótico entre as diferentes fases constituintes do material. O ataque foi feito por imersão durante 40 segundos em reagente de Keller: uma solução com 3 ml de HCl (37%), 2 ml de HF (40%), 5 ml de HNO₃ (65%) e 190 ml de água destilada. Após a imersão, a amostra é passada por água corrente, lavada com álcool e seca com secador.

Análise macrográfica de defeitos e análise micrográfica

Após as etapas de polimento e contraste químico, fez-se uma análise macrográfica, isto é, examinou-se a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X) o aspeto da superfície após devidamente polida e atacada. Deste modo teve-se uma perceção do conjunto quanto à homogeneidade do material, à distribuição e natureza das falhas/porosidades, impurezas, qualidade de soldadura e do tratamento térmico. A análise macrográfica foi realizada de acordo com a norma ISO 10042:2005. Esta norma define as dimensões dos tipos de defeitos que podem ser encontrados na fabricação e é diretamente aplicável ao teste visual de soldadura,

não incluindo detalhes dos métodos recomendados para a detecção ou dimensionamento por métodos não destrutivos. Também não aborda aspetos metalúrgicos como tamanho de grão ou dureza. A norma divide os defeitos em 4 subcategorias:

1. Defeitos superficiais;
2. Defeitos internos;
3. Defeitos geométricos;
4. Defeitos múltiplos.

Esta norma é aplicável aos seguintes processos de soldadura e às suas subcategorias: TIG, MIG e Plasma; à soldadura manual, mecanizada e automática e a todas as posições de soldadura. A norma classifica os níveis de qualidade dos defeitos em juntas soldadas de alumínio e as suas ligas e aplica-se a materiais com espessuras superiores a 0,5 mm. São definidos três níveis de qualidade de forma a permitir a sua aplicação numa ampla gama de soldaduras. Estes são designados pelos símbolos B, C e D. Os valores mais baixos de requisitos (mais rigorosos) correspondem ao nível de qualidade B, seguido de C como requisito intermédio e D como moderado. Os níveis de qualidade referem-se à qualidade de produção e não à aptidão para a finalidade. ^[25]

Foi utilizada a lupa binocular *LEICA EZ4HD* para obtenção das macrografias das quatro zonas para depois, através do *software ImageJ*, medir os dados necessários para a análise dos defeitos de acordo com a norma. Exemplifica-se com a medição do excesso de penetração do cordão de soldadura, Figura 24.

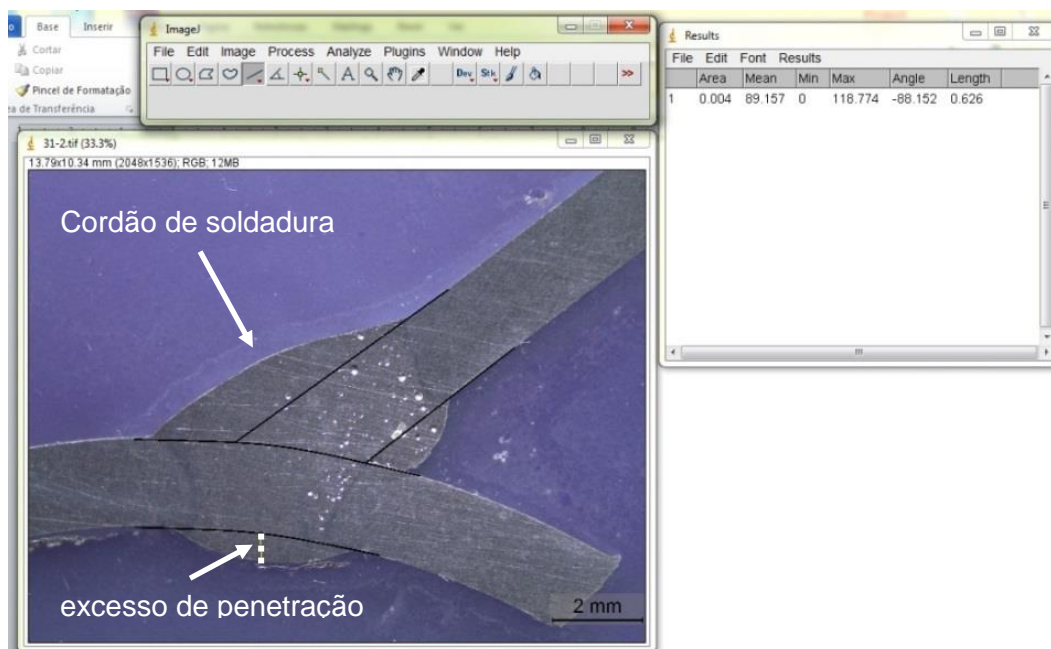


Figura 23: Exemplo de medição do excesso de penetração do cordão de soldadura pelo *software ImageJ*.

Com o microscópio ótico *Nikon Microphot* equipado com máquina fotográfica digital de 3 MPixel e com auxílio do *software Infinity Capture*, foram também obtidas micrografias de

amostras polidas e contrastadas, sem tratamento térmico e outra com tratamento térmico, das zonas da junta de soldadura e zonas termicamente afetadas.

III.2.2 – Análise estrutural por difração de raios X

Como já foi referido anteriormente o tratamento térmico após soldadura é o mais utilizado das medidas para minimizar a perda da resistência mecânica. Com vista a conhecer as fases presentes nas amostras (uma sem tratamento térmico e outra com tratamento térmico) recorreu-se à técnica de difração de raios-X. O ensaio foi feito no difractor de raios-X da marca *Philips Xpert-Pro*.

III.2.3 – Ensaio de tração

Esta técnica consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente num provete, até à rutura ou a um valor predeterminado de deformação permanente. Trata-se de um ensaio destrutivo utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer diversos dados quantitativos das características mecânicas dos materiais.

A máquina de ensaio de tração é projetada para alongar o provete a uma taxa constante de alongamento ou de carga, medindo de forma contínua e simultaneamente a carga instantânea aplicada e o alongamento resultantes. O resultado é registado na forma de força em função do alongamento, tendo sido realizados os ensaios na máquina de ensaios mecânicos universal *Shimadzu AG-X/R Refresh*.

O que determina as propriedades do material ensaiado é a relação entre a tensão e a deformação.^[20,21] A tensão (σ) corresponde à força (F) dividida pela área da secção (S_0) sobre a qual a força é aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

Os provetes têm características especificadas de acordo com as normas técnicas. Neste caso, os provetes têm uma geometria em T de secção circular, como se mostrou na Figura 16. Devido à sua geometria foi necessário desenvolver um sistema para a fixação do provete na máquina de ensaios mecânicos, tal como se mostra na Figura 25. O sistema é fixo em rosca (8) na máquina utilizando um veio central (10) que é seguro em cunha na mesma (11), o provete é estabilizado por fixações inferiores (13, 7, 5) e superiores (12, 3, 2). A meia-lua de fixação horizontal é colocada de modo a que a força seja aplicada na soldadura, isto é, ter largura suficiente e mais próxima da soldadura. É necessário a utilização de tarugos no interior para que não haja deformação da tubagem quando apertado. No caso da fixação superior foi produzido com rugosidade interior para que o provete tenha atrito e não deslizar no sistema quando aplicada a força.

Na Figura 26 mostra-se uma fotografia de um provete montado neste sistema na máquina de ensaios mecânicos. O aço utilizado para produção dos componentes do sistema é o DIN St37.2 (aço 1.0037 ou ISO FE360-B) que tem resistência à tração de aproximadamente 350-500 MPa e cerca de 215-235 MPa de tensão de cedência.

Sabendo que a força é exercida no tubo de diâmetro de 30 mm e 2 mm de espessura, utilizando-se a equação (2):

$$S_0 = \pi(R^2 - r^2) \quad (2)$$

obteve-se uma área da secção de 175,84 mm², e como o limite de resistência à tração da liga 6063 T6 é igual a 245 MPa (valor máximo na tabela 8), a partir da equação (2), calculou-se uma força máxima de 43 kN. Este valor permitiu escolher a célula de carga de 250 kN, a única disponível para esta gama de cargas.

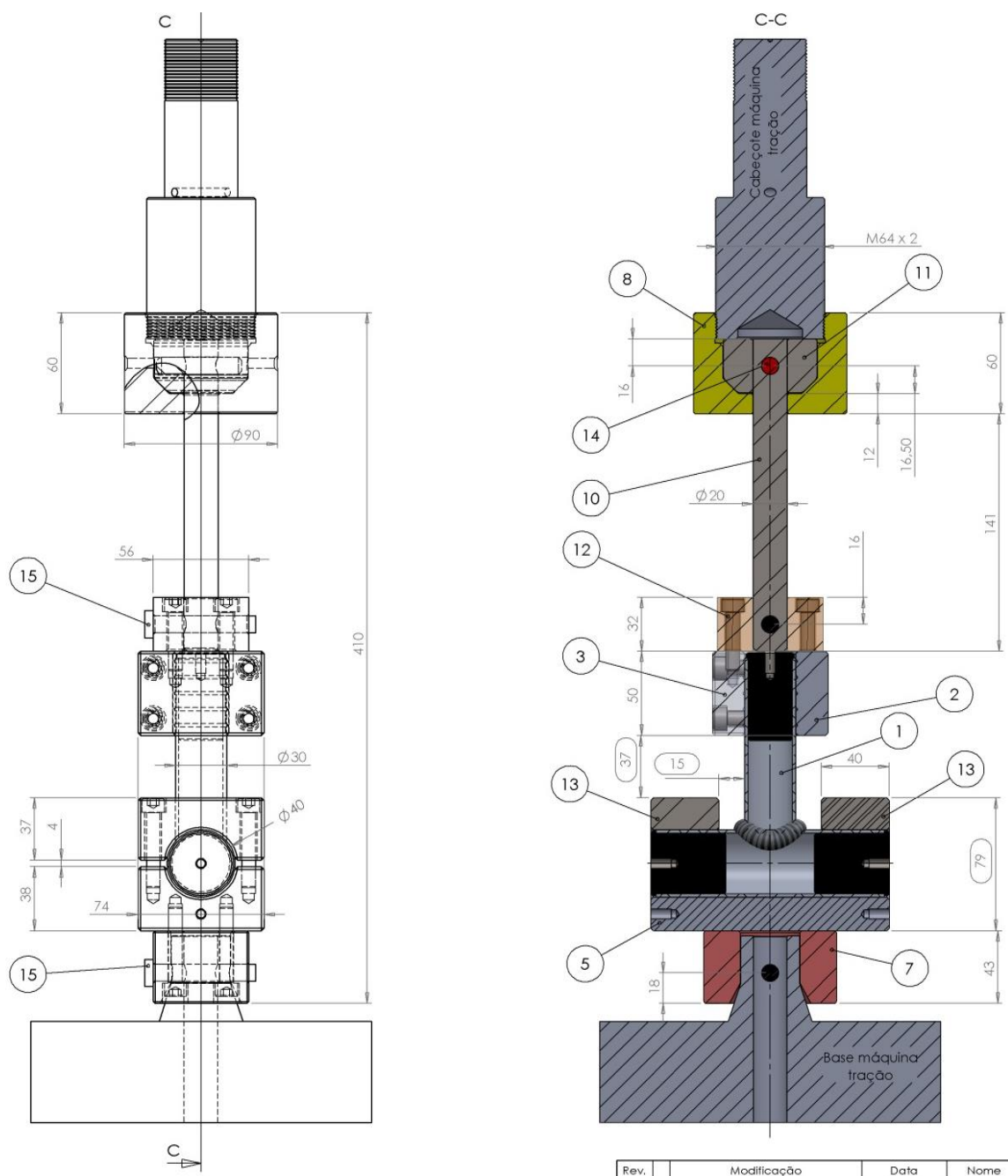


Figura 24: Desenho técnico do sistema de fixação dos provetes (1) para os ensaios de tração, com identificação de todos os componentes produzidos (2 a 14) e ligação com pinos fixadores na máquina (15).

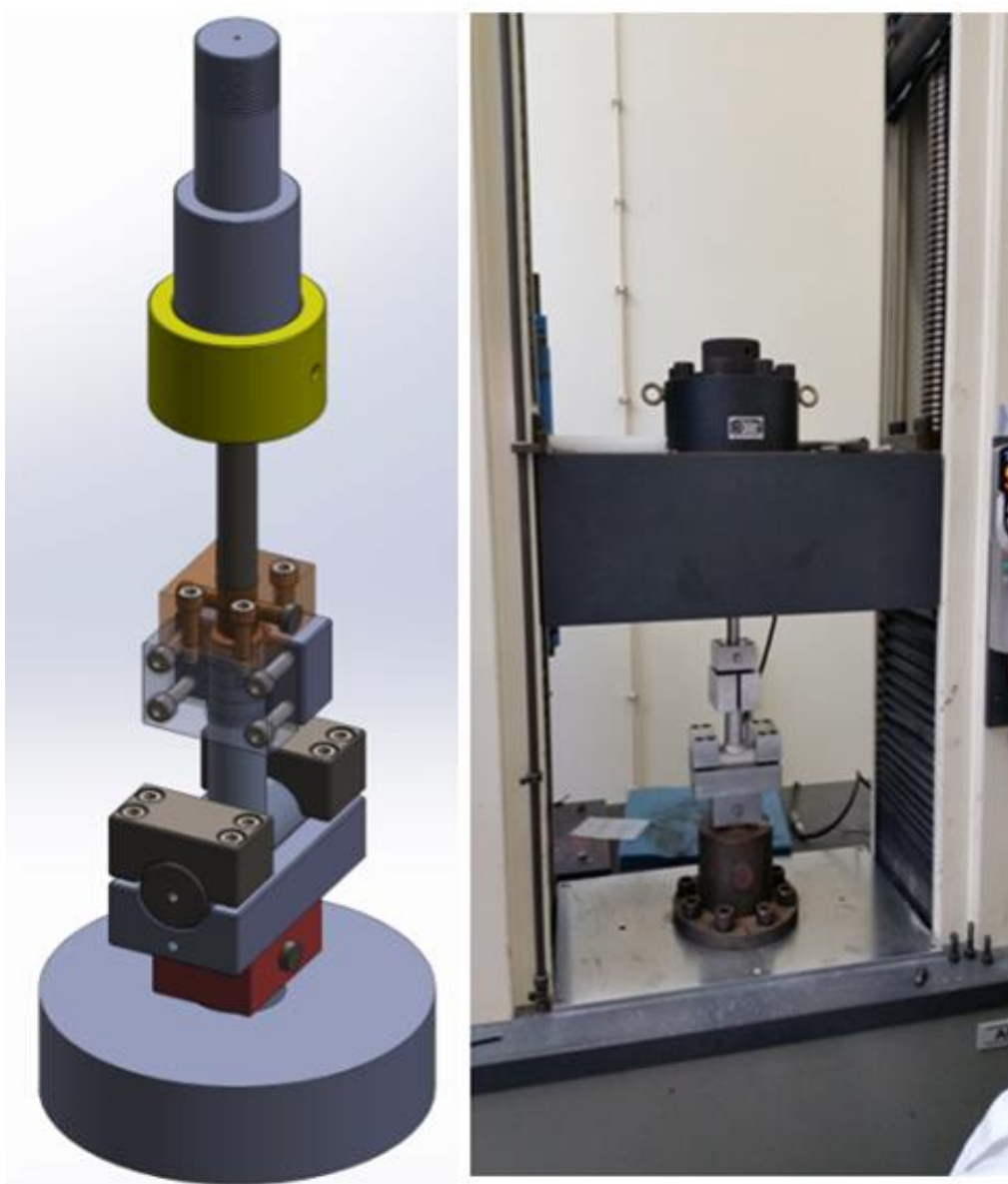


Figura 25: Esquema da montagem com fixação do provete (à esquerda) e fotografia de início de ensaio de um provete na máquina de tração (à direita).

Capítulo IV – Resultados e discussão

Apresentam-se e discutem-se em seguida os resultados obtidos na caracterização dos provetes através das diversas técnicas descritas no capítulo anterior.

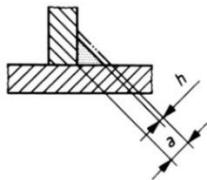
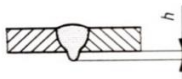
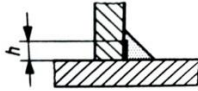
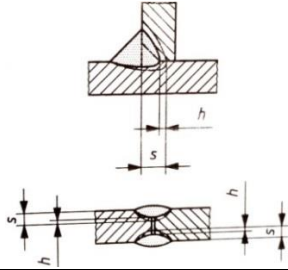
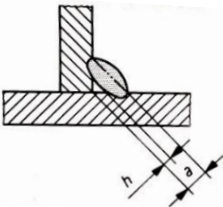
IV.1 – Identificação de defeitos por análise macrográfica

A norma ISO 10042:2005 define num total de 33 tipos de defeitos divididos em 4 subcategorias, referidas anteriormente. A análise realizada ao cordão de soldadura de todos os provetes teve como resultado a identificação e o estudo de 13 desses defeitos, os mais evidentes nas macrografias obtidas nas secções polidas da junta de soldadura. Na tabela 12 organizam-se os defeitos detetados de acordo com a sua localização (interna ou à superfície), a sua designação e o nível de qualidade correspondente, tal como previsto na norma. Na segunda coluna da tabela 12 é identificado o número correspondente ao tipo de defeito na norma. Usando o anexo A, que quantifica percentualmente a quantidade de porosidade tanto superficiais como internas, e as macrografias, faz-se a análise qualitativa da porosidade quanto à sua designação e aos limites dos defeitos de acordo com os níveis de qualidade previstos na norma.

Para a análise os limites de qualidade utilizados foram:

- B – Rigoroso;
- C – Intermédio;
- D – Moderado;
- X – Não autorizado;

Tabela 12: Tipos de defeitos e os seus limites que foram analisados, de acordo com a norma ISO 10042:2005

	Nº	Designação do defeito	Observações	Limites dos defeitos organizados por níveis de qualidade		
				D	C	B
Defeitos superficiais	1.1	Fissura	-	Não autorizado	Não autorizado	Não autorizado
	1.3	Porosidade	Para análise, ver exemplos no anexo A	$\leq 2\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0,5\%$
	1.5	Porosidades alinhadas	-	Não autorizado	Não autorizado	Não autorizado
	1.6	Picadas	Dimensão máxima de uma picada isolada para espessuras de 0,5 a 3 mm	$d \leq 0,3a$ máx. 3 mm	$d \leq 0,2a$ máx. 1,5 mm	$d \leq 0,1a$ máx. 1 mm
	1.13	Material de adição insuficiente		$h \leq 0,3a$ máx. 2 mm	$h \leq 0,2a$ máx. 1,5 mm	$h \leq 0,1a$ máx. 1 mm
	1.14	Excesso de penetração		$h \leq 5 \text{ mm}$	$h \leq 4 \text{ mm}$	$h \leq 3 \text{ mm}$
Defeitos internos	2.1	Fissura	Todos os tipos de fissura, excepto microfissura	Não autorizado	Não autorizado	Não autorizado
	2.3	Porosidade	Dimensão máxima de um poro isolado	$d \leq 0,4a$ máx. 6 mm	$d \leq 0,3a$ máx. 5 mm	$d \leq 0,2a$ máx. 4 mm
	2.4	Porosidade	Análise de porosidades em relação à superfície da secção transversal, Anexo A	$\leq 6\%$	$\leq 2\%$	$\leq 1\%$
	2.6	Porosidade alinhada	-	Defeitos curtos autorizados	Não autorizado	Não autorizado
	2.10	Falta de fusão (colagem)		$h \leq 0,3a$ máx. 3 mm	Não autorizado	Não autorizado
	2.11	Falta de penetração		$h \leq 0,4s$ máx. 3mm	$h \leq 0,2s$ máx. 2mm	Não autorizado
	2.12	Falta de penetração para cordões em ângulo		$h \leq 0,3a$ máx. 2 mm	$h \leq 0,2a$ máx. 1,5 mm	$h \leq 0,1a$ máx. 1 mm

Nas Figuras 27 e 28, representativamente, mostram-se as macrografias das quatro zonas de corte para a análise dos defeitos segundo a norma, isto é, para cada zona de corte é feita a análise de 13 defeitos de acordo com os níveis de qualidade e assim, feita uma tabela para cada provete (os seis provetes desta análise) com os níveis de qualidade, Anexo C.

Esta análise revelou que, em todas as amostras, a zona 1, o início do percurso de soldadura como se mostra na Figura 22, tem a pior qualidade, como se comprova pelo excesso de porosidade e falta de penetração da soldadura nos tubos. Estes defeitos poderão ter ocorrido devido a uma limpeza deficiente (química ou mecânica) das peças antes de soldar, dificultando o arranque da soldadura. Outra hipótese será o tempo e intensidade de corrente insuficiente no ponto inicial (zona 1). Noutros pontos de soldadura (zona 2 a zona 4) embora se apresente excesso de penetração, possivelmente devido ao excesso de intensidade de corrente, de acordo com a norma este defeito encontra-se dentro dos limites.

De acordo com os níveis de qualidade (tabelas no Anexo C) verificou-se que as soldaduras realizadas com o sistema CMT são as que apresentam melhores resultados, Figura B4 e B6 no Anexo B e Figura 28. As porosidades apresentadas ao longo do cordão de soldadura estão relacionadas com a inadequada regulação do gás de proteção ou ambiente aberto com corrente forte de ar.

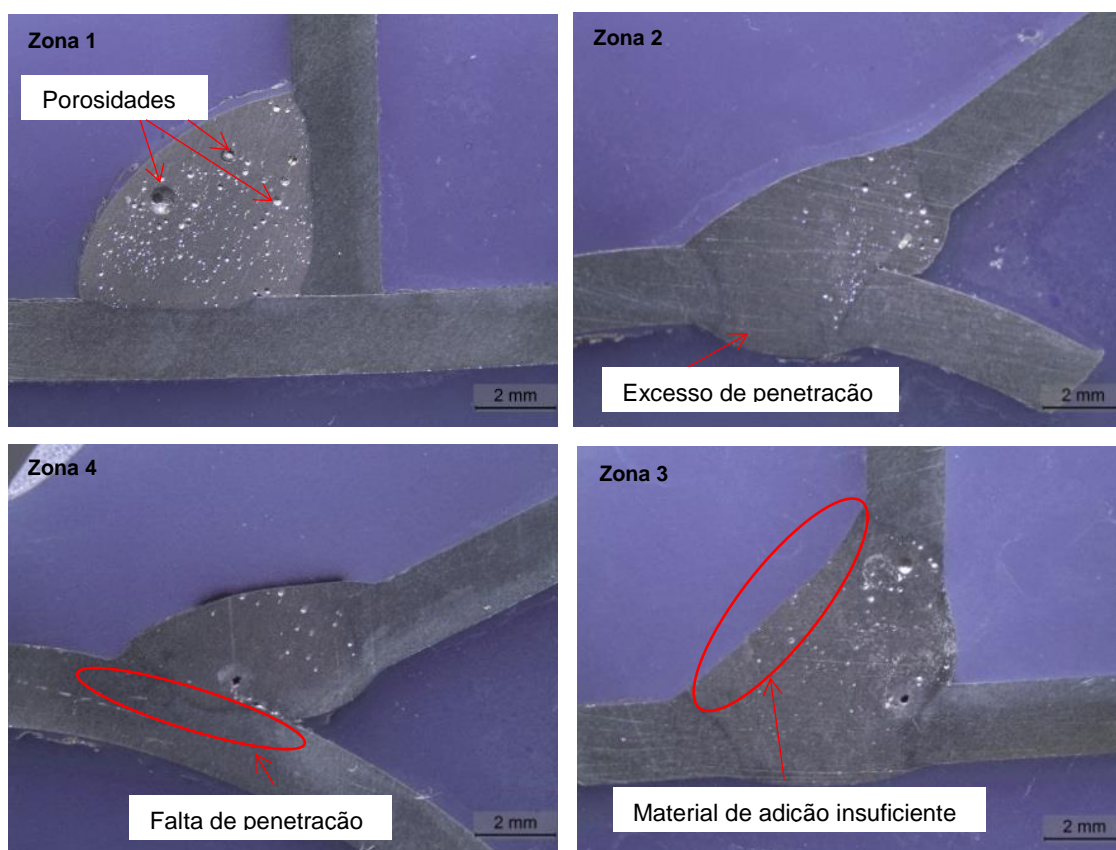


Figura 26: Macrografias das quatro zonas de corte do provete 11 e alguns dos defeitos analisados.

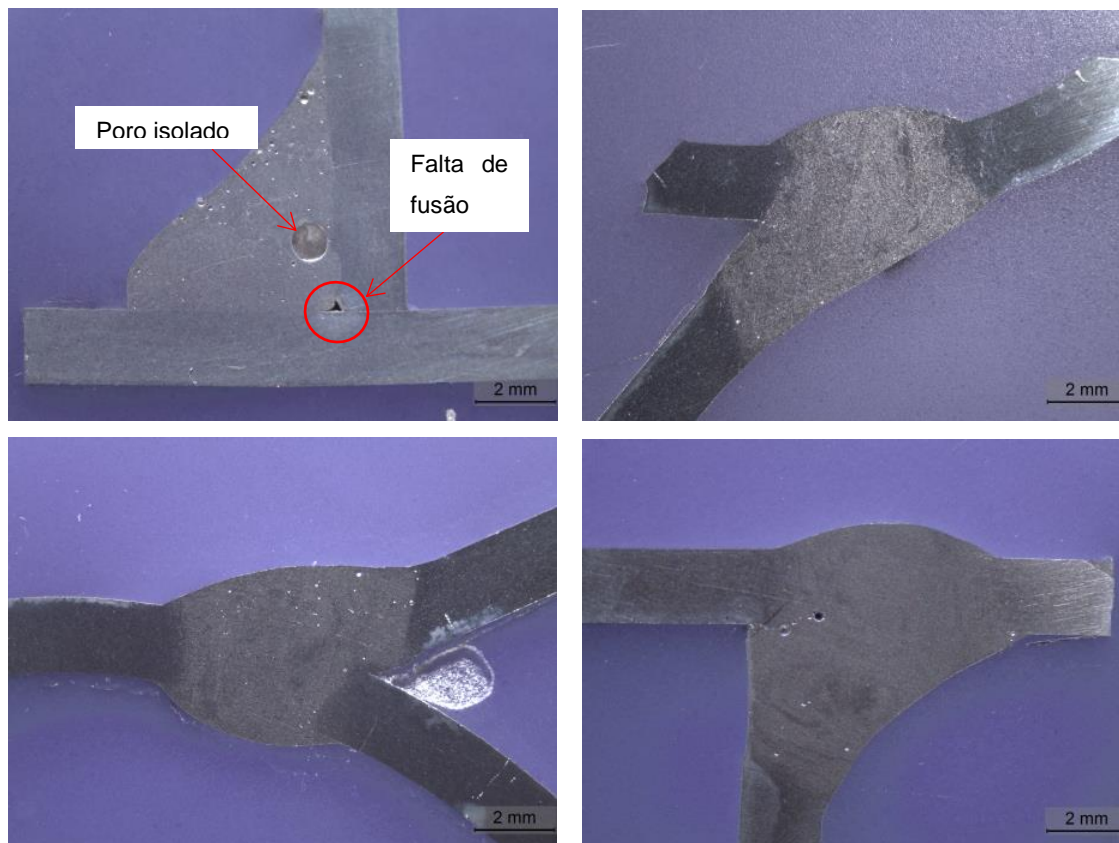


Figura 27: Macrografias das quatro zonas de corte do provete 25 e alguns dos defeitos analisados.

IV.2 – Identificação de fases e análise microestrutural

Identificação de fases e análise microestrutural

A identificação das fases presentes no cordão de soldadura foi feita através de difração de raios-X e da análise microestrutural por microscopia ótica, antes e após tratamento térmico. Na Figura 29a pode observar-se a microestrutura típica da zona do banho de fusão da junta soldada. Neste caso é visível também a presença de poros com dimensão apreciável. Dado que esta região corresponde essencialmente à liga 4043 (metal de adição cuja composição se apresentou na Tabela 5)), a microestrutura revela grãos de solução sólida α -Al com fase intergranular de composição eutética α -Al/Si (diagrama Al-Si, Figura 30). Após tratamento térmico com solubilização a 525°C, têmpera e envelhecimento, Figura 29b, dá-se a transformação da morfologia do constituinte eutético nas fronteiras de grão de α -Al de filme contínuo para globular, e eventualmente a precipitação da fase intermetálica AlFeSi. ^[26]

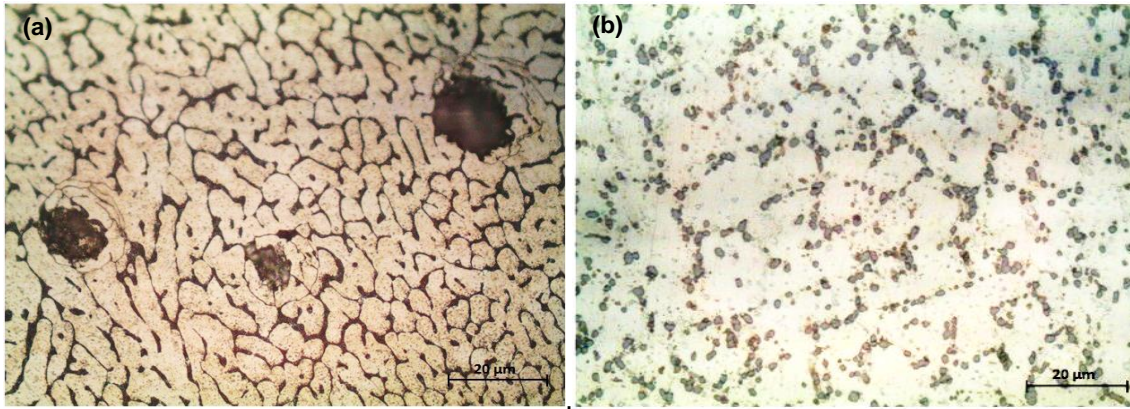


Figura 28: Micrografias da zona fundida da junta soldada antes do tratamento térmico (a) e depois (b).

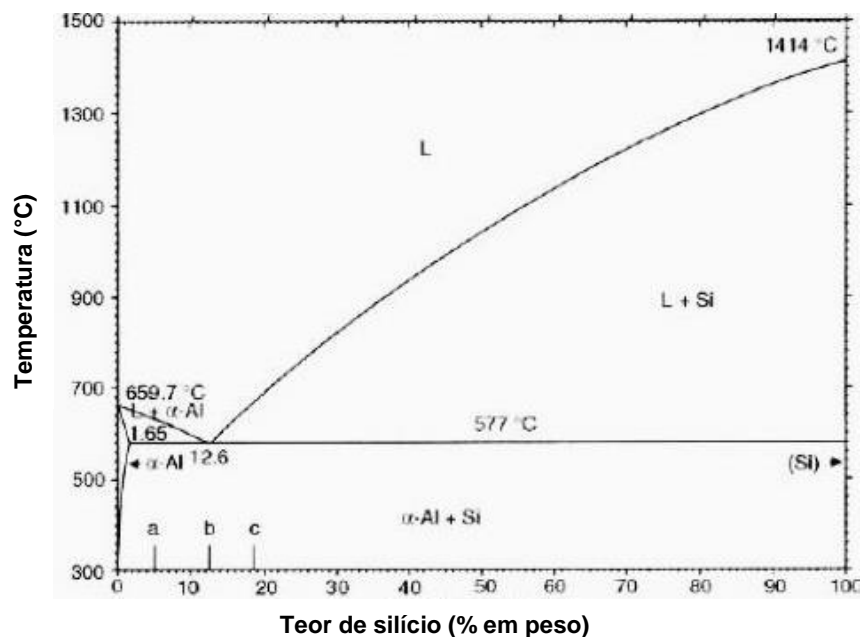


Figura 29: Diagrama de fases Al-Si. [27]

Na Figura 31 apresenta-se uma micrografia típica da zona de transição entre a zona fundida e a ZTA. Na região correspondente ao cordão de soldadura, à esquerda, os cristais de $\alpha\text{-Al}$ revelam o desenvolvimento de dendrites a partir da interface fundido/ZTA, nalguns caso com ramificações secundárias. A região à direita, corresponde à ZTA, é constituída pelo material base 6063. Neste caso, é possível observar, se bem sem grande nitidez, os contornos dos grãos equiaxiais de $\alpha\text{-Al}$ marcados pela precipitação da fase AlFeSi .

Após tratamento térmico, Figura 32, há uma precipitação intensa no interior dos grãos, quer na zona correspondente ao metal de adição, quer na ZTA. No primeiro caso será de precipitados de Si ou AlFeSi . No metal base termicamente afectado, as partículas de intermetálico Mg_2Si levarão ao endurecimento desta região.

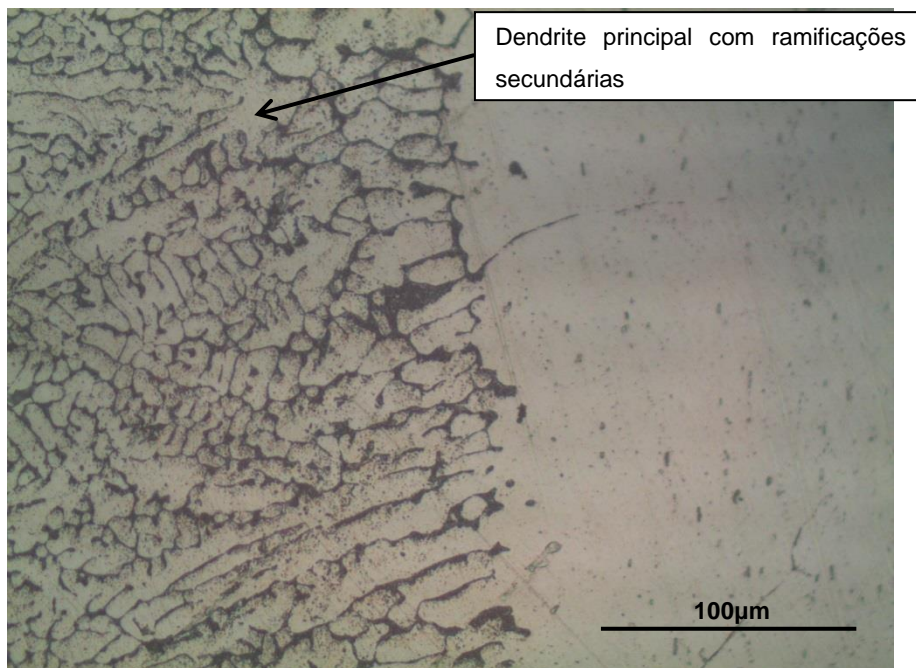


Figura 30: Micrografia ótica do provete 29 relativa à zona entre o cordão de soldadura e a ZTA antes do tratamento térmico.

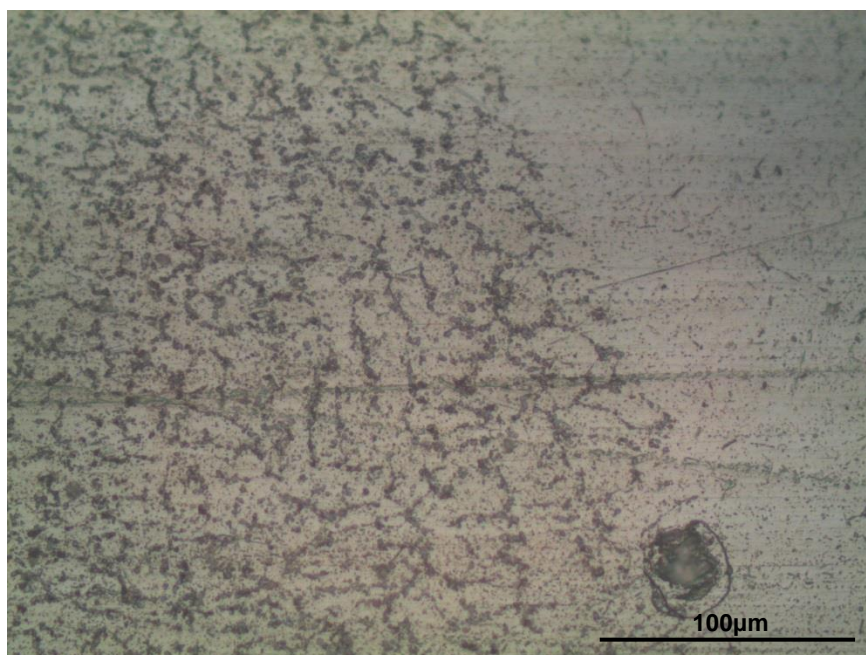


Figura 31: Micrografia ótica do provete 17 relativa à zona entre o cordão de soldadura e a ZTA após o tratamento térmico.

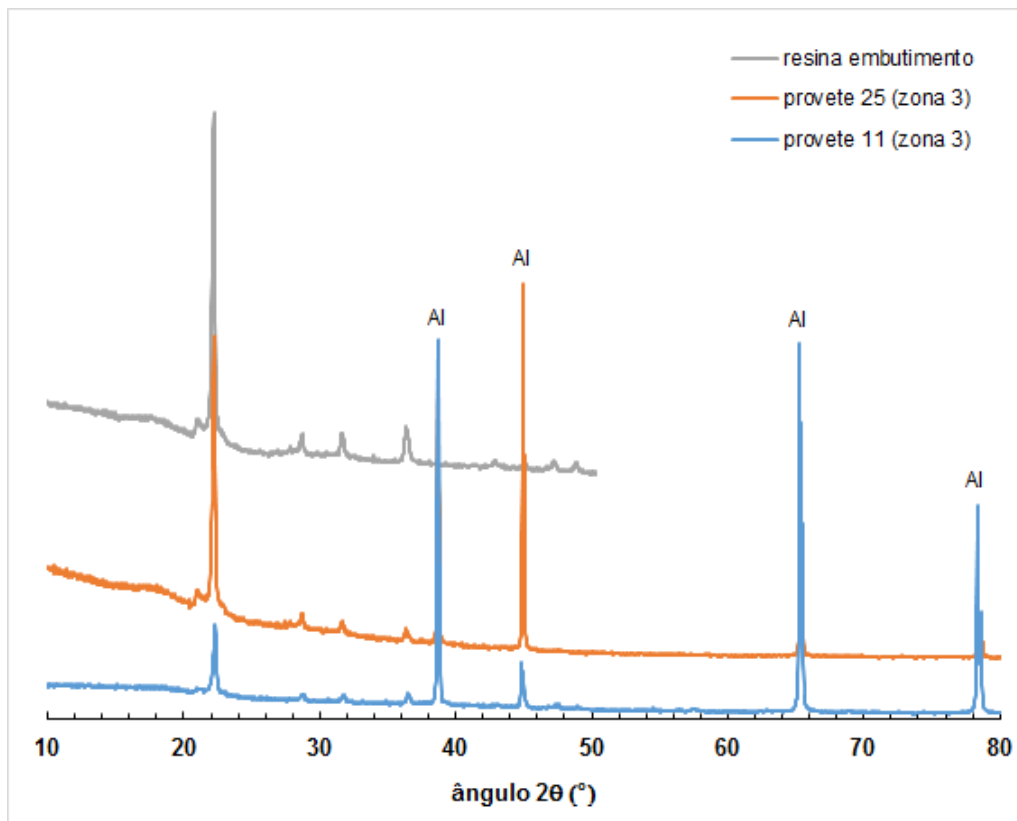


Figura 32: Difratoograma da zona 3 dos provetes 11 e 25 e da resina de embutimento.

Os difratogramas de raios X das juntas soldadas antes e após tratamento térmico encontram-se na Figura 33. Além da fase principal, o alumínio, identificam-se também os picos correspondentes à resina de polimetilmetacrilato, que contém SiO_2 na sua composição. Não se conseguiu identificar a estrutura da fase intermetálica pois a sua percentagem na liga é muito baixa e a área de análise é muito grande, o que dificulta ainda mais a sua deteção por esta técnica.

IV.4 – Comportamento à tração

O ensaio de tração das juntas em T soldadas é atípico devido à geometria do provete, tendo o sistema de fixação sido estudado para que a força exercida se localizasse no cordão de soldadura do provete. Após a cedência, entra-se no regime de deformação plástica e o provete sofre deformações permanentes, cerca de 9% da dimensão inicial no tubo de Ø40, Figura 33.



Figura 33: Deformação do tubo.

Em resposta à solicitação mecânica a fratura ocorreu, de maneira geral, na transição entre o cordão de soldadura e a zona termicamente afetada (ZTA), como se pode observar na Figura 34a. Noutros provetes a fratura ocorreu essencialmente no interior do cordão de soldadura (provetes 2, 7, 20 e 30), Figura 34b.

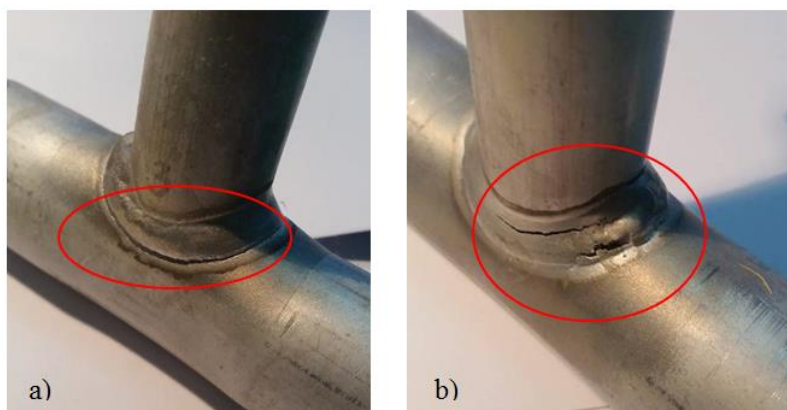


Figura 34: a) Fratura na ZTA do provete 26 e b) fratura no cordão de soldadura do provete 20.

O conjunto de valores da tensão de rutura obtidos nos ensaios de tração em provetes soldados está registado na Tabela 13.

Tabela 13: Valores de tensão de rutura.

Sequência de programa	Provete	Tensão de rutura (MPa)
(4) – (3) – (1)	1	180
(5) – (4) – (1)	2	194
	3	168
	4	189
	5	185
	7	173
	8	197
	10	235
	12	209
	13	186
	14	207
	15	191
CMT (6) – (4) – (2)	16	211
	20	170
(Pendular) CMT (6) – (4) – (2)	21	204
	22	212
	24	210
(6) – (5) – (2)	26	212
	27	198
	30	201

Obteve-se um valor médio de 197 ± 17 MPa, sendo o valor mínimo de 168 MPa. Deste modo a resistência da junta soldada e tratada termicamente encontra-se entre os valores para a liga 6063-T6 (tensão de rutura máxima de 245 MPa, Tabela 8), e o valor da resistência à tração para a liga 4043 (145 MPa ^[28]). Por outro lado, juntas soldadas por MIG da liga 6063 com adição de liga 4043 e envelhecidas naturalmente apresentam um valor típico de tensão de rutura de 206 MPa.^[29] Note-se que os provetes com menor resistência mecânica tendem a fraturar no cordão de soldadura enquanto os que fraturam junto à ZTA têm maiores valores de resistência mecânica. Isto poderá indicar que a origem da fissuração está nos defeitos identificados ou na falta de ligação metalúrgica ou excesso de porosidade na zona 1, o início da soldadura.

Deste modo pode afirmar-se que a qualidade mecânica da generalidade das soldaduras realizadas neste trabalho será adequada para aplicação em quadros de bicicletas.

Capítulo V – Conclusões

A análise macro e micrográfica da soldadura MIG de tubos de liga Al 6063 com metal de adição Al 4043 e a caracterização da respetiva resistência mecânica permitem concluir que:

i) os principais tipos de defeitos que se observam no cordão de soldadura são: fissuras, porosidade, porosidade alinhada, picadas, material de adição insuficiente, excesso ou falta de penetração da soldadura.

ii) a microestrutura típica do cordão de soldadura revela a presença de dendrites de solução sólida α -Al com fase intergranular de composição eutética α -Al/Si. Após têmpera e envelhecimento o constituinte eutético passa de filme contínuo para globular. Na interface fundido/zona termicamente afetada (ZTA) os cristais de α -Al mostram dendrites com ramificações secundárias, no lado do fundido e grãos equiaxiais de α -Al marcados por uma possível precipitação da fase AlFeSi.

iii) a resistência da junta soldada e tratada termicamente encontra-se entre os valores da liga 6063-T6 (tensão de rutura máxima de 245 MPa), e o valor da resistência à tração para a liga 4043 (145 MPa), com valor médio de 197 ± 17 MPa. Em mais de 40% dos provetes, as juntas soldadas têm um valor típico de tensão de rutura igual ou superior a 206 MPa, o valor de referência para esta combinação de ligas.

As principais conclusões de carácter prático a retirar deste trabalho são:

1) a soldadura por curto-circuito com arco pulsado (CMT- cold metal transfer) é a que permite obter juntas com menor quantidade de defeitos. Com este processo controla-se o arco elétrico durante a soldadura, o método de transferência do metal e a quantidade de energia térmica transferida para o material base. É o que apresenta melhores características para aplicar na automatização de processos de soldadura de peças com geometria complexa, em que é fundamental a baixa entrega térmica de modo a diminuir a deformação na peça e a ausência de salpicos.

2) o início do percurso de soldadura é uma zona crítica devido ao excesso de porosidade e/ou à falta de penetração da soldadura nos tubos. Para a obtenção de uma soldadura de boa qualidade é necessário adequar progressivamente os parâmetros devido às variações de temperatura e posição relativa da tocha/material. Deve fornecer-se corrente mais elevada no início para que haja penetração de soldadura pois o material está frio, após o arranque e devido à condutividade térmica do alumínio, não é necessária tanta corrente para haver penetração pois o material aquece com o calor já produzido.

Com o fim de obter melhores resultados, o presente estudo deverá ter uma continuação de forma a ser possível realizar soldaduras de forma reprodutível e com os níveis mínimos de defeitos. Para a sua aplicação na construção de quadros de bicicleta de alumínio será necessário complementar a caracterização mecânica com ensaios de fadiga e de resistência ao impacto.

Capítulo VI – Trabalho adicional desenvolvido na empresa durante o estágio

Este estágio permitiu-me conhecer o meio industrial e presenciar o dia-a-dia da empresa. À parte do tema de tese e as tarefas que eram necessárias a serem desenvolvidas para o mesmo, fui envolvida em outras actividades, como:

- Sistematização da informação sobre a matéria-prima do projecto de alumínio;
- Arquivo de documentos
- Colocação dos desenhos técnicos (SW) no sistema implementado na empresa e registo de pequenas alterações dos mesmos;
- Acompanhamento da linha de produção.

Tive a oportunidade de acompanhar alguns projectos com outras empresas, como: com a *Forjaço*, uma referência nacional na indústria do forjamento de aço; com a *VLaser-ON*, uma empresa que tem como serviços o corte laser bidimensional e a quinagem e com a *Simoldes*, uma empresa com uma acumulação de know-how em moldes de injeção que faz com que sejam líderes da indústria europeia no fabrico destes.

Contactei com outras empresas que fornecem serviços à MIRALAGO como: a Haertha, especializada em tratamento térmico de aços; a Cunhicorte 2000, Lda, cunhos e cortantes e a empresa Soldaduras Técnicas de Joaquim Ferreira, Lda.

Bibliografia

- [1] R. Coraini, "Soldagem GMAW robotizada de alumínio: influência do tipo de chanfro, tectimento e sentido de laminação na distorção angular", III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Unesp – Bauru, 2009.
- [2] K.M. Figueiredo; "Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2000
- [3] T.V. Capelari, "Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo de FSW na soldagem da liga de alumínio AA5052"; Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- [4] M. Cancelier, "Análise do acabamento da superfície e tempo de usinagem na manufatura de molde de sopro de alumínio 6351 otimizado estratégias de usinagem.", 2014
- [5] J. M. M. V. Pereira, "Estudo das ligas de alumínio aplicadas em construção naval nomeadamente na resistência à corrosão em estruturas navais soldadas", Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010
- [6] "MAXAL – Guide for aluminum welding" [online] Disponível em: http://www.maxal.com/files/quicksiteimages/maxal_guide_for_aluminum_wldg_6-11_doc.pdf [Acedido a: 11/03/2016]
- [7] "Gas metal arc welding" [online] Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_metal_arc_welding [Acedido a: 11/03/2016]
- [8] "Composição química da liga 6061, 6063 e 6082" [online] Disponível em: http://www.broncesval.com/pt_broncesval/catalogo/index.asp?categoria=1&producto=10 [Acedido a: 20/6/2016]
- [9] "Diagrama de fases pseudo-binário Al-Mg₂Si" [online] Disponível em: <http://www.slideshare.net/waheedhassan52/ironiron-carbide-phase-diagrams> [Acedido a 9/11/2016]
- [10] "Tratamentos térmicos de ligas de alumínio"; [online] Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=57> [Acedido a: 9/1/2016]
- [11] R. Neto, "Tratamentos térmicos das ligas de alumínio", 2014
- [12] "Mechanical properties wrought alloys – aluselect" [online] Disponível em: <http://aluminium.matter.org.uk> [Acedido a: 24/5/2016]
- [13] William D. Callister, Jr., "Fundamentals of Materials Science and Engeneering", Fifth Edition, 2000.
- [14] Carlos S.C. Viana, "Seleção dos materiais – Alumínio e suas ligas", 2009
- [15] AFSA – Aluminium Federation of Southern Africa, "The welding of aluminium MIG and TIG fusion", Second Edition, 2004
- [16] P.J. Modenesi, P.V. Marques e D.B. Santos, "Introdução à metalurgia de soldagem", 2012
- [17] "Tipos de transferências MIG/MAG – GMAW" [online] Disponível em: <http://soldadura.org> [Acedida a: 12/02/2016]

- [18] “Aula mecânica e electromecânica tecnologia da soldagem cópia” [online] Disponível em: <http://pt.slideshare.net> [Acedido a: 15/5/2016]
- [19] F. Silva, “Soldadura Robotizada com Tecnologia CMT”, Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal, 2015.
- [20] “CMT – Cold Metal Transfer” [online] Disponível em: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-D7944542-EAF7CA7C/fronius_international/M_06_0001_EN_CMT_leaflet_44211_snapshot.pdf [Acedido a: 8/02/2015]
- [21] “Defeitos de soldaduras” [online] Disponível em: <http://www.rocdacier.com/ressource.n.395/defauts-des-soudures.html> [Acedido a: 20/10/2015]
- [22] SAE Aerospace, “Heat treatment of wrought aluminium alloy parts”, 2011
- [23] F.V Nery, “Avaliação de danos via ensaio de tração do aço inoxidável ferrítico AISI 444”, 2012.
- [24] “Ensaaios dos materiais” [online] Disponível em: http://www.urisan.tcche.br/~lemm/arquivos/ensaaios_mecanicos.pdf [Acedido a: 15/07/2016]
- [25] Norme Internationale ISO 10042, “ Soudage – Assemblages en aluminium et alliages d’aluminium soudés à l’arc – Niveaux de qualité par rapport aux défauts”, 2005
- [26] M. Carvalhosa, “Heterogeneidades em ligas de alumínio da série 6XXX”, Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro, 2014
- [27] “Diagrama de fases Al-Si” [online] Disponível em: <http://www.slideshare.net/waheedhassan52/ironiron-carbide-phase-diagrams> [Acedido a: 06/12/2016]
- [28] “Resistência mecânica da liga 4043” [online] Disponível em: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8685#4> [Acedido a: 28/11/2016]
- [29] Ficha técnica ALCOTEC [online] Disponível em: <http://www.alcotec.com/us/en/support/upload/a4043tds.pdf> [Acedida a: 21/11/2016]

ANEXOS

Anexo A – Exemplos de determinação para percentagens de porosidades.

Anexo B – Macrografias de secções de provetes representativos dos vários programas de soldadura.

Anexo C – Tabelas dos níveis de qualidade para os tipos de defeitos identificados em cada provete.

ANEXO A – Exemplos de determinação para percentagens de porosidades, de acordo com a norma ISO 10042:2005

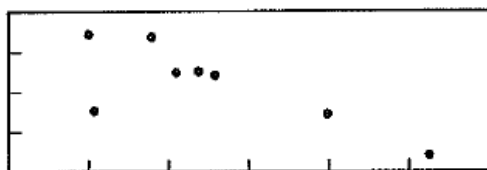


Figure A.1 — 0,5 %

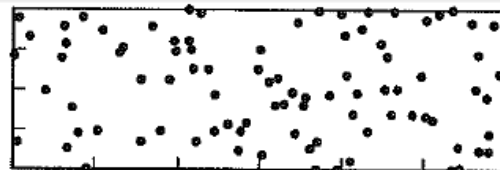


Figure A.6 — 6 %

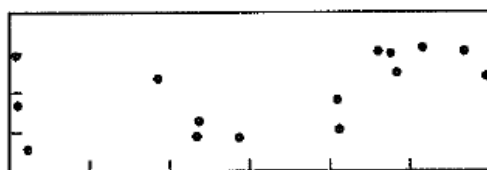


Figure A.2 — 1 %

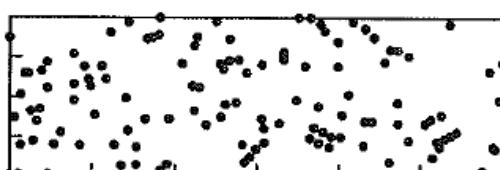


Figure A.7 — 8 %

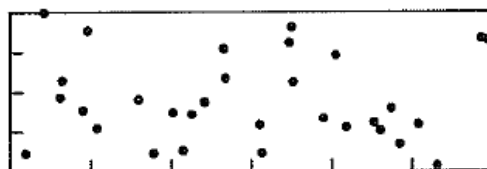


Figure A.3 — 2 %

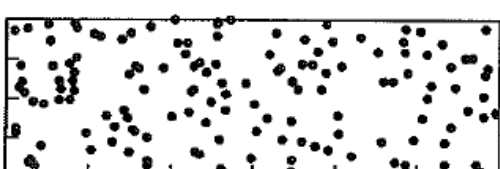


Figure A.8 — 10 %

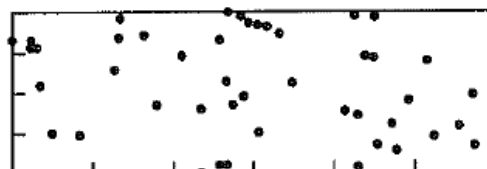


Figure A.4 — 3 %

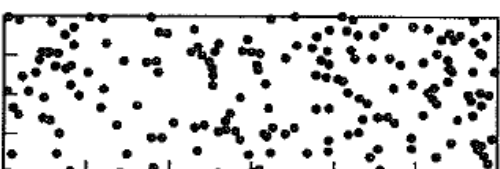


Figure A.9 — 15 %



Figure A.5 — 4 %

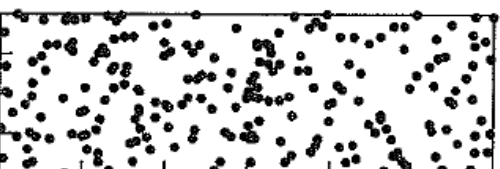


Figure A.10 — 20 %

Anexo B – Macrografias de secções de provetes representativos dos vários programas de soldadura.

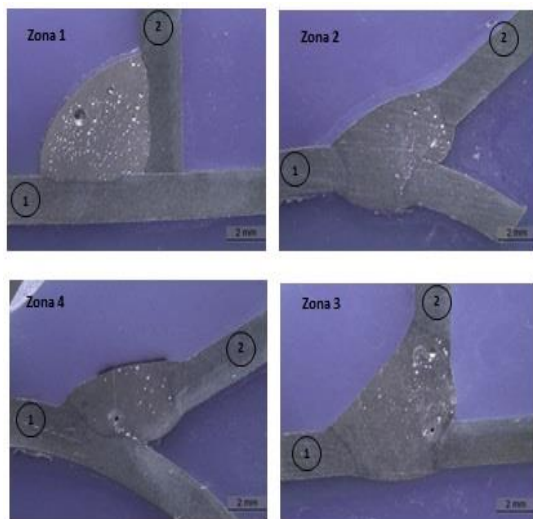


Figura B1: Provete 11 para análise de defeitos.

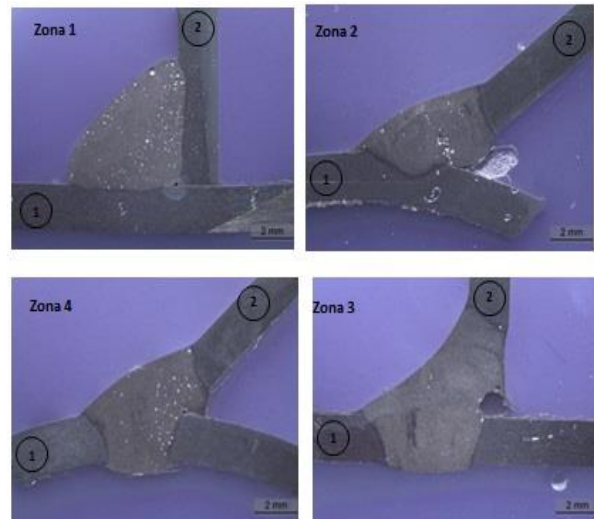


Figura B2: Provete 6 para análise de defeitos.

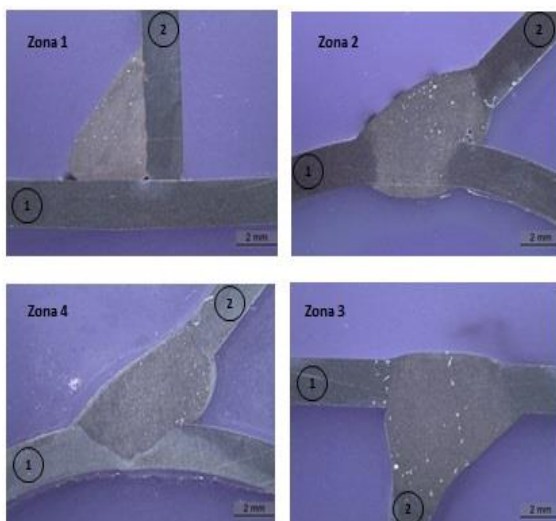


Figura B3: Provete 29 para análise de defeitos

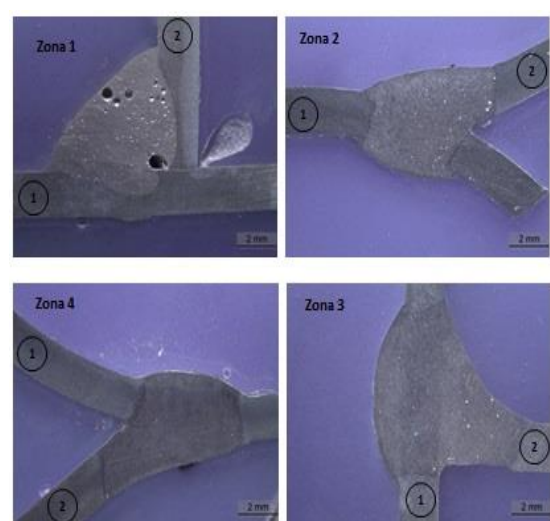


Figura B4: Provete 17 para análise de defeitos

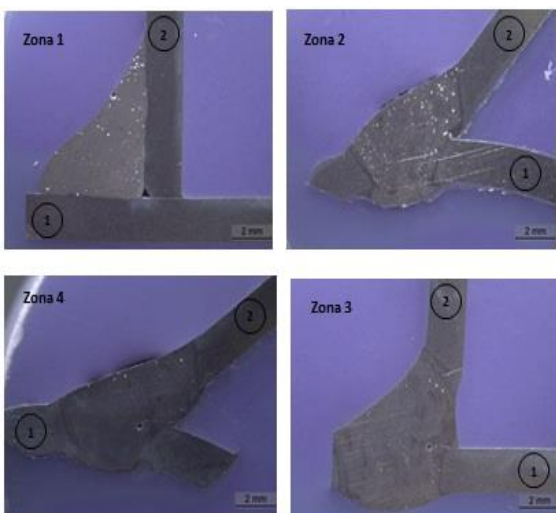


Figura B5: Provete 23 para análise de defeitos.

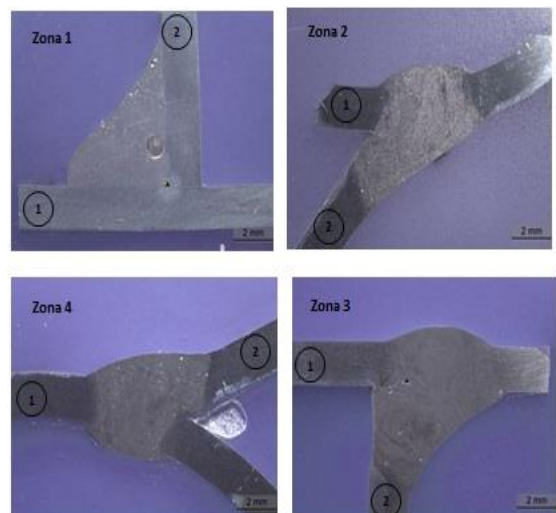


Figura B6: Provete 25 para análise de defeitos.

Anexo C – Tabelas dos níveis de qualidade para os tipos de defeitos observados em cada provete.

Tabela C1: Níveis de defeitos do provete 6.

Defeito	Z1	Z2	Z3	Z4
1.1	B	B	B	B
1.3	B	B	C	B
1.5	B	B	B	B
1.6	B	B	C	B
1.13	B	B	C	B
1.14	B	B	B	B
2.1	B	B	B	B
2.3	B	B	B	B
2.4	D	C	B	C
2.6	C	D	B	B
2.10	B	B	B	B
2.11	D	X	B	B
2.12	B	B	B	B

Tabela C2: Níveis de defeitos do provete 11.

Defeito	Z1	Z2	Z3	Z4
1.1	B	B	B	B
1.3	C	B	C	B
1.5	B	B	X	B
1.6	B	C	B	B
1.13	B	B	C	B
1.14	B	B	B	B
2.1	B	B	B	B
2.3	B	B	B	B
2.4	D	C	B	B
2.6	X	D	D	D
2.10	B	B	B	B
2.11	C	B	B	X
2.12	B	B	B	B

Tabela C3: Níveis de defeitos do provete 29.

Defeito	Z1	Z2	Z3	Z4
1.1	B	B	B	B
1.3	B	B	B	B
1.5	B	B	B	B
1.6	B	B	B	B
1.13	B	B	C	B
1.14	B	B	B	B
2.1	B	B	B	B
2.3	B	B	B	B
2.4	B	C	B	B
2.6	D	B	B	B
2.10	X	B	B	B
2.11	B	B	B	B
2.12	B	B	B	B

Tabela C4: Níveis de defeitos do provete 17.

Defeito	Z1	Z2	Z3	Z4
1.1	B	B	B	B
1.3	B	C	B	B
1.5	B	B	B	B
1.6	B	B	C	B
1.13	B	B	C	B
1.14	B	B	B	B
2.1	B	B	B	B
2.3	B	B	B	B
2.4	C	B	B	B
2.6	D	B	B	B
2.10	B	B	B	B
2.11	C	B	B	B
2.12	B	B	B	B

Tabela C5: Níveis de defeitos do provete 23.

Defeito	Z1	Z2	Z3	Z4
1.1	B	B	B	B
1.3	C	B	B	B
1.5	B	C	B	B
1.6	B	B	B	B
1.13	B	B	C	B
1.14	B	B	B	B
2.1	B	B	B	B
2.3	B	B	B	B
2.4	C	C	B	B
2.6	D	B	B	B
2.10	D	B	B	B
2.11	D	B	B	B
2.12	B	B	B	B

Tabela C6: Níveis de defeitos do provete 25.

Defeito	Z1	Z2	Z3	Z4
1.1	B	B	B	B
1.3	B	B	B	B
1.5	B	B	B	B
1.6	B	B	B	B
1.13	B	B	C	B
1.14	B	B	B	B
2.1	B	B	B	B
2.3	B	B	B	B
2.4	B	B	B	B
2.6	B	B	D	B
2.10	D	B	B	B
2.11	D	B	B	B
2.12	B	B	B	B